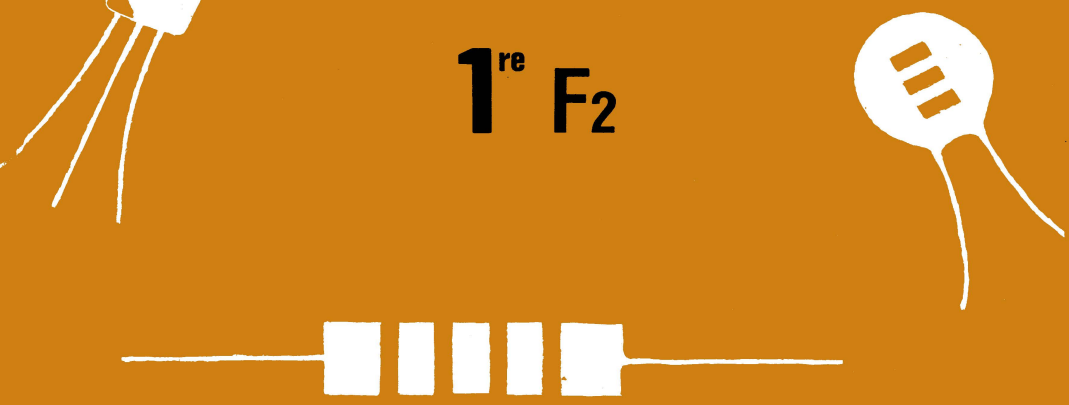
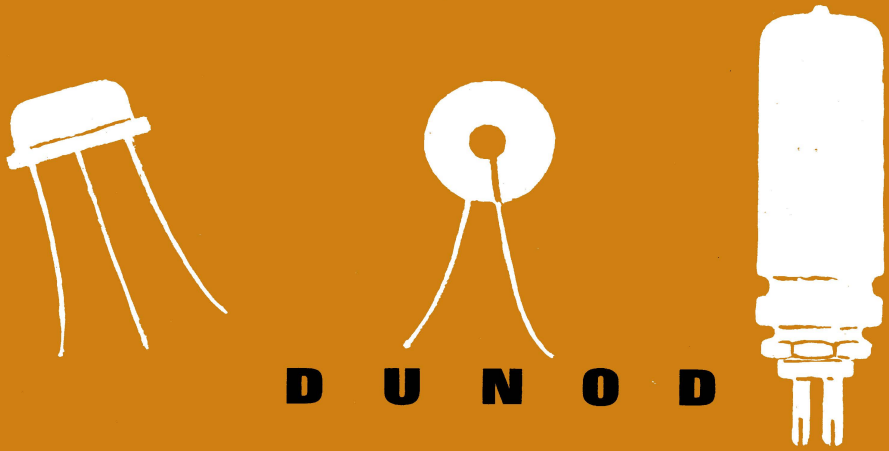
Préparation au baccalauréat
de technicien en électronique

J. MORNAND

technologie d'électronique

1re F2





DUNOD

TECHNOLOGIE D'ÉLECTRONIQUE

1ere F_2

PAR

J. MORNAND

Ingénieur des Arts et Métiers
Professeur de technologie à l'I.U.T. d'Angers

QUATRIÈME ÉDITION

OUVRAGE INSCRIT SUR LA LISTE DES MANUELS ADOPTÉS PAR LES ÉCOLES LE LA VILLE DE PARIS
OUVRAGE ADOPTÉ PAR LE CENTRE D'ENSEIGNEMENT DE L'O.R.T.F.

Préparation au baccalauréat de technicien en électronique

DUNOD
PARIS
1969

DU MÊME AUTEUR

Chez **DUNOD**, Éditeur

Technologie d'électronique. Matériel des télécommunications. Préparation au baccalauréat de technicien et au brevet de technicien supérieur électronicien.

Tome II.

Schémas d'électronique. Matériel des télécommunications. Préparation au brevet de technicien supérieur électronicien.

Tome I.

Tome II. — Option " télécommunications ".

©, 1969 DUNOD

Toute reproduction, même partielle, de cet ouvrage est interdite. Une copie ou reproduction par quelque procédé que ce soit, photographie, microfilm, bande magnétique, disque ou autre, constitue une contrefaçon passible des peines prévues par la loi du 11 mars 1957 sur la protection des droits d'auteur.

AVANT-PROPOS

Le programme de technologie comporte l'étude des éléments ou matériels entrant dans la réalisation des montages électroniques. Le programme de 1967 est tel que l'étude technologique des éléments et composants est associée intimement à l'établissement du schéma.

La technologie doit, en principe, suivre le développement du cours d'électronique et doit être adaptée à l'évolution des techniques.

Le tome I est conforme au programme de la classe de première F2 et le tome II à celui de la classe de terminale F2. La synchronisation de l'étude des différents éléments des programmes de schéma et de technologie oblige à un éparpillement des composants électroniques de même nature. Nous avons préféré regrouper ces composants (résistances, condensateurs, semi-conducteurs, tubes électroniques...) dans des chapitres plus homogènes. Cela évite des redites au sujet de matériels qui ont en commun des propriétés identiques.

Notre premier souci a été de présenter un ouvrage pédagogique dans lequel les matériaux utilisés, les procédés de fabrication, les caractéristiques des composants sont toujours étudiés à partir des bases physiques.

Notre second souci, sachant la difficulté de trouver parmi une littérature de plus en plus prolifique les renseignements dont on a besoin, a été de fournir une abondante documentation, concise et précise, dans laquelle les élèves et techniciens pourront puiser les éléments nécessaires à la résolution de leurs problèmes.

Programme de technologie de la *classe de* $1^{ère}$ F_2 préparant au Baccalauréat de technicien en Électronique

1967

— Matériaux conducteurs, isolants. Utilisation pour la fabrication des fils et câbles et des organes de jonctions et d'interruption intervenant dans la réalisation des circuits :
  — fils rigides et souples isolés,
  — bornes, douilles, fiches,
  — interrupteurs à levier et bouton-poussoir,
  — inverseurs à levier et bouton-poussoir.

— Résistances bobinées - matériaux résistants utilisés.

— Potentiomètres - contacteurs.

— Diode à pointe - diode à jonction - caractéristiques limites - technologie - diode Zener.

— Résistances bobinées de puissance.

— Résistances au carbone aggloméré et à couche - caractéristiques - limites d'emploi - normalisations - codes.

— Cathodes thermioniques.

— Structure du T.R.C.

— Supports de tubes électroniques.

— Notions sur les caractéristiques technologiques des triodes et pentodes.

— Transistor - classification technologique (alliage - dirft - mesa, etc.) en fonction des domaines d'utilisation. Caractéristiques technologiques des différentes catégories.

— Condensateurs à diélectrique papier imprégné à feuilles métallisées - condensateurs à diélectrique plastique - condensateurs à diélectrique tantale B.T.

— Relai électromagnétique.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER. — *Notions sur la constitution de la matière.*

I. Particules élémentaires 1
II. Atomes 1
III. Couche électronique 2
IV. Ions positifs, ions négatifs 2
V. Classification périodique 3
VI. Liaisons entre atomes 3
VII. Cristaux 4

CHAPITRE 2. — *Propriétés électriques des matières d'œuvres.*

I. Propriétés du domaine de l'électrostatique 5
II. Propriétés du domaine de l'électrocinétique 9
III. Propriétés du domaine du magnétisme 14
IV. Pertes dans les bobines et condensateurs 17
V. Facteur de pertes 18
VI. Normes 20

CHAPITRE 3. — *Les conducteurs.*

I. Généralités 21
II. Désignations normalisées 22
III. Le fer et ses alliages 24
IV. Le cuivre et ses alliages 34
V. L'aluminium et ses alliages 36
VI. Les métaux 38
VII. Normes 45

CHAPITRE 4. — *Les isolants.*

I. Généralités 46
II. Isolants minéraux 48
III. Isolants organiques 51
IV. Isolants synthétiques 53
V. Normes 63

CHAPITRE 5. — *Utilisation des matériaux.*

I. Fils 64
II. Câbles 65
III. Organes de jonction 67
IV. Organes d'interruption 73
V. Relais électromagnétiques 75

CHAPITRE 6. — *Les résistances fixes.*

I. Généralités 79
II. Résistances métalliques 83
III. Résistances au carbone 91
IV. Résistances à couche d'oxydes 95
V. Marquage 95
VI. Essais 97
VII. Normes 98

CHAPITRE 7. — *Les résistances réglables.*

I. Généralités 100
II. Résistances ajustables 103
III. Potentiomètres bobinés 104
IV. Potentiomètres au carbone 111
V. Potentiomètres à couche d'oxyde 117
VI. Potentiomètres ajustables 117
VII. Protection des potentiomètres 118
VIII. Lois de variations des potentiomètres 119
IX. Essais 120
X. Normes 121

CHAPITRE 8. — *Les condensateurs fixes.*

I. Généralités 122
II. Condensateurs à diélectrique solide. 125
III. Condensateurs électrolytiques 147
IV. Applications 157
V. Essais 159
VI. Marquage 160
VII. Normes 161

CHAPITRE 9. — *Les tubes électroniques.*

I. Généralités. 163
II. Les cathodes 167
III. Les grilles 174
IV. Les anodes. 176
V. Les enveloppes 179
VI. Les éléments complémentaires 183
VII. La diode 186
VIII. La triode 191
IX. La tétrode 196
X. La pentode 199
XI. Tubes à plus de trois grilles 203
XII. Tubes multiples 204
XIII. Tubes cathodiques 205
XIV. Code des tubes 216
XV. Essais 218
XVI. Normes 219

CHAPITRE 10. — *Les dispositifs à semi-conducteurs.*

I. Généralités 221
II. Corps simples semi-conducteurs 222
III. Corps composés semi-conducteurs 224
IV. Redresseurs secs 225
V. Diodes à cristal 232
VI. Transistors à deux jonctions. 239
VII. Code 248
VIII. Normes 248

UNITÉS SI

(Système international)

Grandeur	Symbole	Unité	Symbole
Longueur	l	mètre	m
Surface	S	mètre carré	m^2
Volume	V	mètre cube	m^3
Temps	t	seconde	s
Vitesse	v	mètre par seconde	m/s
Accélération	γ	mètre par seconde par seconde	m/s^2
Masse	m	kilogramme	kg
Force	F	newton	N
Energie	W	joule	J
Puissance	P	watt	W
Moment	$\mathcal{M}$	mètre-newton	$m \wedge N$
Pression, contrainte	p	pascal	Pa
Fréquence	f	hertz	Hz
Intensité de courant	I	ampère	A
Différence de potentiel	U (V)	volt	V
Résistance	R	ohm	Ω
Quantité d'électricité	Q	coulomb	C
Capacité	C	farad	F
Champ électrique	E	volt par mètre	V/m
Résistivité	ρ	ohm-mètre	$\Omega.m$
Flux d'induction	Φ	weber	Wb
Induction magnétique	B	tesla ou Wb/m^2	T
Force magnétomotrice	F	ampère ou ampère-tour	At
Champ magnétique	H	ampère (tour) par mètre	A/m

Autres unités :

1 kgf = 9,81 N = 9,81 × 10^5 dynes ≈ 1 daN
1 Wb = 10^8 M (maxwell)
1 T = 10^4 G (gauss)
1 A/m = $4\pi \times 10^{-3}$ Oe (oersted)
1 At = $4\pi \times 10^{-1}$ Gb (gilbert).
1 kgf/mm^2 = 9,81 MPa ≈ 1 daN/mm^2.

CHAPITRE PREMIER

CONSTITUTION DE LA MATIÈRE (1)

I. PARTICULES ÉLÉMENTAIRES.

Electron : Particule élémentaire contenant la plus petite charge d'électricité négative. Sa masse au repos est sensiblement égale à la 1 840e partie de celle de l'atome d'hydrogène.

Charge de l'électron : $1{,}6 \times 10^{-19}$ coulomb.

Masse de l'électron : $9{,}1 \times 10^{-38}$ gramme.

Proton : Particule élémentaire contenant la plus petite charge d'électricité positive et dont la masse est de l'ordre de celle de l'atome d'hydrogène.

Neutron : Particule élémentaire dont la masse est sensiblement égale à celle du proton et la charge totale nulle.

II. ATOMES.

L'atome est la plus petite partie d'un corps simple à l'état électrique neutre, susceptible d'entrer dans les combinaisons chimiques.

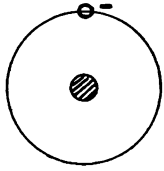
L'atome est constitué d'un noyau atomique autour duquel gravite un cortège d'électrons répartis sur une ou plusieurs couches.

Le noyau atomique chargé positivement contient presque toute la masse de l'atome. Il est constitué par la réunion de protons et neutrons sauf pour l'hydrogène dont le noyau se réduit à un proton.

La représentation schématique des atomes d'hydrogène, d'oxygène et de fer est donnée aux figures 1-1, 1-2 et 1-3. Cette représentation ne tient pas compte de la place exacte des éléments constitutifs, de leur trajectoire, de leurs mouvements, de leurs proportions.

(1) Un certain nombre de définitions sont tirées de la norme C 01-005 : vocabulaire électrotechnique.

Le diamètre d'un atome est compris entre 0,1 et 0,4 millimicrons.



1 *proton*
1 *électron*

Fig. 1-1
Hydrogène

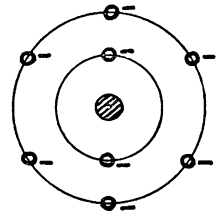


Fig. 1-2
Oxygène

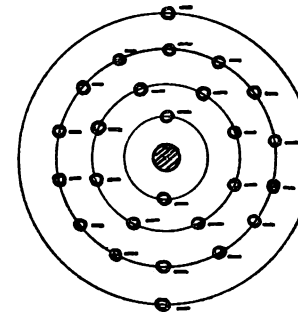


Fig. 1-3
Fer

Le nombre de masse correspond au nombre total de protons et de neutrons constituant le noyau atomique. Exemple :

Fe 56 = 26 protons + 30 neutrons.

III. COUCHE ÉLECTRONIQUE.

Les électrons qui gravitent autour du noyau sont répartis sur plusieurs couches en fonction de leur niveau énergétique.

Les électrons périphériques appartiennent normalement à la couche électronique externe qui intervient dans les phénomènes lumineux, dans les phénomènes de conduction, ainsi que dans les propriétés chimiques de l'atome. Ces électrons s'appellent encore électrons optiques, électrons de valence ou électrons de conduction.

Un électron libre est un électron qui s'est échappé de l'attraction du noyau et peut se mouvoir librement dans la matière ou dans le vide. Un électron devient libre le plus souvent à la suite d'un choc avec une autre particule. L'agitation thermique qui fait vibrer les atomes en expulsant un certain nombre d'électrons périphériques en est un exemple particulier.

IV. IONS POSITIFS, IONS NÉGATIFS.

Un ion est un atome ou un groupe d'atomes possédant une charge électrique totale non nulle.

Si un atome perd ou capture un ou plusieurs électrons, la charge positive du noyau n'est plus entièrement neutralisée. L'atome incomplet devient suivant le cas un ion positif ou un ion négatif.

V. CLASSIFICATION PÉRIODIQUE (voir tableau 3-6).

Elle est due au chimiste russe Mendéléev qui la publia en 1870. Les éléments sont placés les uns à la suite des autres, le nombre atomique (1) augmentant chaque fois d'une unité. On revient à la ligne chaque fois que commence une nouvelle couche électronique.

Les éléments d'une même colonne appartiennent à la même famille chimique et ont des propriétés voisines.

VI. LIAISONS ENTRE ATOMES.

Liaison ionique. — Elle fait intervenir l'électrovalence correspondant à un gain ou une perte d'électron (2). Les ions ne sont pas liés (inexistence de la molécule). L'édifice est le résultat d'un équilibre entre les forces d'attraction et de répulsion électrostatiques. C'est le cas des sels tel que le chlorure de sodium (fig. 1-4).

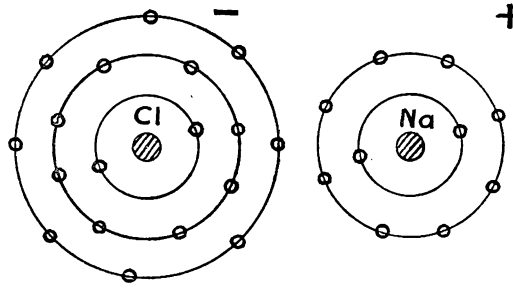


Fig. 1-4
Liaison ionique : Chlorure de sodium Na Cl

Liaison covalente. — Elle fait intervenir la mise en commun d'électrons entre les atomes. On obtient un véritable lien entre atomes (existence de la molécule).

C'est le cas des molécules de chlore, d'oxygène (fig. 1-5).

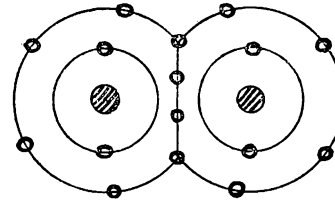


Fig. 1-5
Molécule d'oxygène O_2

(1) Le nombre atomique indique le nombre d'électrons, ou encore le nombre de protons du noyau.

(2) Valence : C'est le nombre d'atomes d'hydrogène qu'un atome ou un ensemble d'atomes peut remplacer dans une combinaison chimique.

Dans les deux cas, les atomes tendent à avoir leur couche électronique externe complète (généralement 8 électrons).

Les liaisons covalentes sont toujours plus difficiles à rompre que les liaisons électrovalentes.

VII. CRISTAUX.

Un certain nombre de corps solides, en particulier les métaux, cristallisent, c'est-à-dire que les atomes sont rangés suivant un motif géométrique régulier (maille) qui se répète pour former un cristal.

Le motif et les dimensions des mailles permettent d'expliquer un certain nombre de propriétés physiques des corps correspondants.

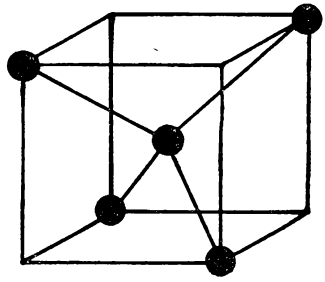


Fig. 1-6
Maille élémentaire du réseau cristallin du diamant

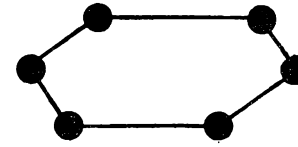


Fig. 1-7
Maille élémentaire du réseau cristallin du graphite

Les figures 1-6 et 1-7 montrent la disposition des atomes de carbone dans les cristaux de diamant et graphite. La différence de dureté en particulier est la conséque ce de la nature cristalline, ainsi que la différence de conductivité (diamant isolant, graphite conducteur).

CHAPITRE 2

PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES MATIÈRES D'ŒUVRES

I. PROPRIÉTÉS DU DOMAINE DE L'ÉLECTROSTATIQUE.

A) Définitions [1].

1° Électrostatique. — Elle traite des phénomènes de l'électricité au repos.

2° Conducteur. — C'est une substance ou un corps pouvant donner passage continu à un courant électrique.

Les métaux sont des conducteurs et ont, en général, moins de 4 électrons sur la couche périphérique des atomes qui les constituent. Par exemple le cuivre et l'aluminium qui sont parmi les meilleurs conducteurs n'ont que 2 électrons périphériques. L'attraction électrostatique du noyau sur ces électrons est faible et les chocs dus à l'agitation thermique leur permettent de pouvoir s'échapper et de se mouvoir entre les atomes et les ions positifs. Sous l'action d'un champ électrique ces électrons libres prennent un mouvement d'ensemble qui constitue le courant électrique. Pour les courants usuels la vitesse de déplacement d'ensemble est de l'ordre du mètre par seconde.

3° Isolant. — C'est une substance ou un corps dont la conductivité est nulle, ou en pratique très faible.

Les métalloïdes sont des isolants et ont en général plus de 4 électrons sur leur couche périphérique. Ils restent fortement liés au noyau et ne permettent pas l'établissement d'un courant électrique.

Les isolants industriels ont des molécules formées d'atomes dont les électrons périphériques sont fortement liés par les liaisons interatomiques et qui ne peuvent donner lieu à un courant électrique.

[1] Voir NF C01-005, vocabulaire électrotechnique.

4° Semi-conducteur. — C'est un conducteur non métallique d'électrons.

Les semi-conducteurs sont des corps simples dont les plus importants (germanium, silicium) possèdent 4 électrons périphériques, ou des corps composés (sulfures, oxydes) qui ont des propriétés électriques intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

5° Diélectrique. — Milieu matériel dans lequel peut exister à l'état stationnaire un champ électrique.

Les meilleurs diélectriques sont choisis parmi les isolants (voir Chapitre 10).

B) Rigidité diélectrique.

1° Différents types de décharge. — Considérons un condensateur formé de deux armatures séparées par un diélectrique (fig. 2-1). Le condensateur

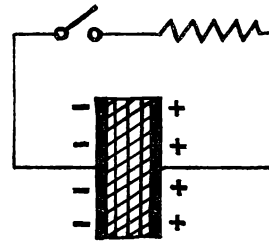


Fig. 2-1
Décharge d'un condensateur

est chargé c'est-à-dire que l'une des armatures porte un nombre d'électrons supérieur à celui de l'autre armature. L'égalisation des charges des armatures peut s'effectuer de 3 façons.

a) DÉCHARGE NORMALE.

Lorsqu'on ferme l'interrupteur, les électrons peuvent circuler dans les conducteurs et les charges des armatures s'égalisent.

b) DÉCHARGE LENTE.

L'interrupteur étant ouvert, l'égalisation des charges se fera très lentement par le diélectrique car celui-ci n'est pas un isolant parfait. La décharge sera d'autant plus longue que les qualités isolantes du diélectrique seront meilleures.

c) DÉCHARGE DISRUPTIVE.

Lorsque la différence des charges des armatures dépasse une certaine limite une étincelle jaillit avec perforation du diélectrique s'il est solide.

Dans le cas d'un isolant solide on dit communément qu'il y a « claquage ». Le diélectrique est détruit. On appelle tension disruptive celle qui est nécessaire pour produire la décharge disruptive.

2° Rigidité diélectrique. — C'est la propriété d'un diélectrique de s'opposer à la décharge disruptive. Elle est égale au quotient de la tension disruptive par l'épaisseur du diélectrique.

La tension disruptive ou tension de perforation s'exprime conventionnellement par la valeur de la tension de crête qui produit le claquage divisée par $\sqrt{2}$.

$$\text{Rigidité} = \frac{U_d}{e}$$

Unités usuelles : U_d en kV; e en mm; rigidité en kV/mm.

La rigidité augmente si l'épaisseur diminue d'où il est préférable d'utiliser des isolants fractionnés (plusieurs feuilles de papier sont meilleures qu'un carton de même épaisseur totale; emploi de chaînes d'isolateurs au lieu d'un seul).

La rigidité diélectrique du mica, qui est l'une des meilleures, est de l'ordre de 60 kV/mm pour $e = 0{,}4$ mm. Cette valeur dépend de l'origine du diélectrique, de son épaisseur, des conditions physiques du milieu dans lequel il est placé, de la nature de la tension appliquée et de sa durée d'application.

La rigidité diélectrique de la plupart des gaz (O_2, N_2, H_2, CO_2...), est voisine de celle de l'air sec à la pression atmosphérique (3 kV/mm). Elle est nettement inférieure pour les gaz rares (hélium, argon, ...) et les vapeurs métalliques. Elle est nettement supérieure (2 à 3 fois) pour quelques gaz contenant du chlore et du fluor (hexafluorure de soufre SF_6, tétrachlorure de carbone CCl_4, fréon CCl_2F_2).

D'autre part la tension disruptive pour un gaz dépend uniquement du produit de la pression par la distance entre les armatures (loi de Paschen).

Un condensateur prévu pour une tension continue nominale de service U_n est essayé sous une tension $U_e = 3\ U_n$. La tension disruptive U_d doit être supérieure à la tension d'essai U_e.

C) Permittivité.

Si nous changeons la nature du diélectrique entre les armatures d'un condensateur chargé, les forces d'attraction qui existent entre ces armatures sont modifiées. L'influence du diélectrique sur ces forces peut être caractérisée par une constante appelée :

Permittivité absolue (ε) ou constante diélectrique.

Permittivité du vide :

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{9 \times 4\pi} \text{ C/V m dans le système } SI.$$

Permittivité relative (ε_r) ou pouvoir inducteur spécifique :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \qquad \text{(grandeur sans dimension).}$$

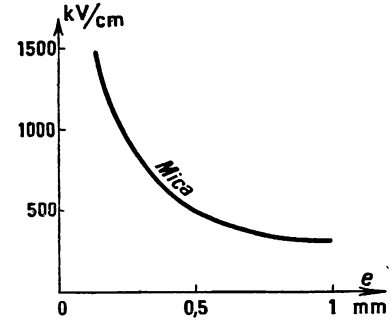


Fig. 2-2. — Rigidité du mica en fonction de l'épaisseur

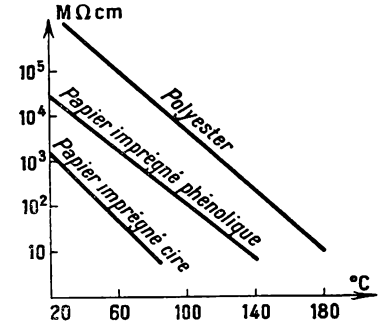


Fig. 2-3 — Résistivité de quelques isolants en fonction de la température

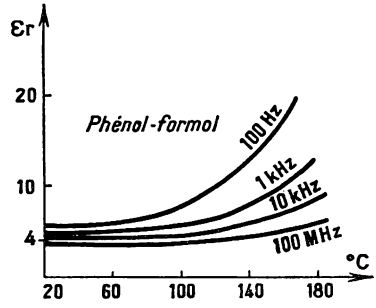


Fig. 2-4

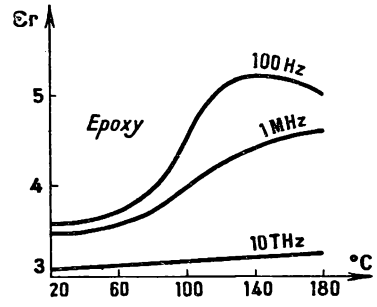


Fig. 2-5

Permittivités relatives des résines phénol-formol et époxy en fonction de la température

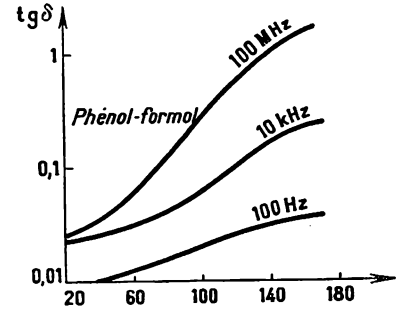


Fig. 2-6

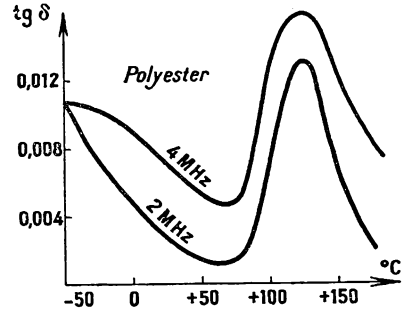


Fig. 2-7

Variation des pertes diélectriques des résines phénol-formol et polyester en fonction de la température.

Plus la permittivité est grande (1), plus l'épaisseur du diélectrique peut être faible toutes choses égales par ailleurs.

L'obtention de matériaux (céramiques) ayant des permittivités de l'ordre de 100 a permis la fabrication de condensateurs subminiatures.

(1) Lorsque le terme permittivité est utilisé seul il s'agit de la permittivité relative.

La permittivité relative permet de calculer la capacité d'un condensateur connaissant la surface des armatures et l'épaisseur du diélectrique (voir chapitre 10).

Les isolants ayant des permittivités importantes sont les céramiques 6 à 10 000, les micas 6 à 9, l'alumine 9, le verre pour condensateurs 8,5.

La permittivité des isolants solides augmente avec la température, celle des gaz et des liquides augmente avec la pression.

D) Pertes diélectriques.

Les isolants utilisés en électronique ne sont pas parfaits et présentent une certaine conductibilité. Elle est due à un déplacement d'électrons qui arrivent à s'échapper des couches électroniques externes des atomes qui constituent l'isolant. Cette conductibilité est augmentée par la présence d'impuretés, en particulier l'humidité, surtout si les diélectriques sont poreux.

D'autre part, lorsqu'on soumet le diélectrique a un champ électrique variable les molécules frottent les unes contre les autres ce qui se traduit par une perte d'énergie. La polarisation du diélectrique dépend non seulement de l'intensité actuelle du champ, mais aussi des valeurs antérieures (hystérésis diélectrique).

De plus lorsque le champ électrique varie, il existe un décalage entre les variations de la polarisation du diélectrique et l'intensité du champ qui les produit (viscosité diélectrique).

L'ensemble de ces phénomènes se traduit par une énergie transformée en chaleur dans le diélectrique « pertes diélectriques ».

Les pertes dépendent évidemment de la nature de l'isolant. Elles sont *proportionnelles à la fréquence* et au carré du champ électrique pour un volume donné.

II. PROPRIÉTÉS DU DOMAINE DE L'ELECTROCINÉTIQUE.

A) Définitions.

1° Electrocinétique. — Elle traite des phénomènes de l'électricité en mouvement, abstraction faite des phénomènes magnétiques qui en résultent.

2° Tension ou différence de potentiel. — Lorsque le nombre d'électrons en deux points d'un conducteur est différent, les charges électriques en ces deux points sont aussi différentes et la tension exprime cette différence.

La tension U s'exprime en volts (symbole V).

3° Intensité de courant. — Le courant électrique correspond à un déplacement d'ensemble des électrons libres (1) dans les conducteurs. La vitesse d'écoulement, égale au nombre d'électrons qui traversent une section déterminée de conducteur pendant l'unité de temps, est l'intensité du courant.

L'intensité I s'exprime en ampères (symbole A). On adopte comme sens du courant le sens opposé à celui des électrons.

(1) Un raisonnement analogue peut être fait lorsqu'il s'agit de déplacement d'ions.

4° Résistance. — Les électrons qui circulent dans les conducteurs le font avec plus ou moins de facilité suivant les conditions physiques du milieu dans lequel ils se déplacent. La résistance électrique exprime la difficulté du déplacement.

La résistance R s'exprime en ohms (symbole Ω). L'ohm est la résistance électrique qui existe entre deux sections d'un fil conducteur lorsqu'une différence de potentiel constante de 1 volt appliquée entre ces deux sections, produit dans ce conducteur un courant de 1 ampère, ce conducteur n'étant le siège d'aucune force électromotrice.

La relation de proportionnalité entre la tension et l'intensité, dans le cas de courant continu pour un élément de circuit qui n'est le siège d'aucune force électromotrice, s'appelle la loi d'Ohm pour une résistance morte :

$$U = R\,I$$

L'inverse de la résistance s'appelle la conductance G et s'exprime en Ω^{-1}.

B) Résistivité.

1° Définition. — C'est le produit de la résistance d'un fil d'une substance donnée par le quotient de la section de ce fil par sa longueur.

$\rho = R\frac{s}{l}$, ce qui permet de calculer la résistance d'un fil connaissant sa résistivité, sa section et sa longueur.

$$R = \rho\,\frac{l}{s}$$

La résistivité ρ est caractéristique de la nature du conducteur.

R : résistance en ohms : Ω ;
l :longueur en mètres : m ;
s : section en mètres carrés : m^2 ;
ρ : résistivité : $\Omega\ m^2/m$, ou plus simplement : Ω m.

L'ordre de grandeur des résistivités est le microhm-centimètre pour les conducteurs, l'ohm-centimètre pour les semi-conducteurs et le mégamégohm-centimètre pour les isolants ($1\ \Omega\,m = 10^2\ \Omega$ cm).

Exemples :

Cuivre, $\rho = 1{,}6\ \mu\Omega$ cm $= 1{,}6 \times 10^{-8}\ \Omega$ m.
Silicium, $\rho = 60\ \Omega$ cm.
Téflon, $\rho = 10\,000\ T\Omega$ cm $= 10^{16}\ \Omega$ m.

L'inverse de la résistivité s'appelle la conductivité et s'exprime en Ω^{-1} par mètre.

2° Influence de la température.

a) CONDUCTEUR.

On appelle coefficient de température α, le quotient de la variation relative de la résistivité $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ par la variation de température Δt ce qui s'écrit :

$$\alpha = \frac{\Delta \rho}{\rho \cdot \Delta t} \text{ (1)}$$

Si ρ_t est la résistivité à la température t degrés Celsius et ρ_0 la résistivité à 0 °C, la relation ci-dessus peut s'écrire après transformation :

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

Le coefficient de température qui est positif pour les conducteurs s'exprime généralement en millionièmes par degré Celsius.

Exemple : Le manganin utilisé à la fabrication de résistances bobinées de précision a un coefficient de température $\alpha = 15 \times 10^{-6}$ par degré Celsius.

Si nous traçons la courbe que représente la variation de la résistivité en fonction de la température on obtient une droite (fig. 2-8).

Variations de la résistivité en fonction de la température

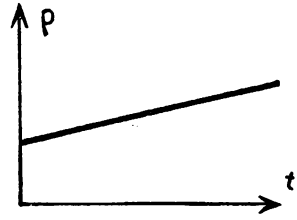


Fig. 2-8
Conducteur

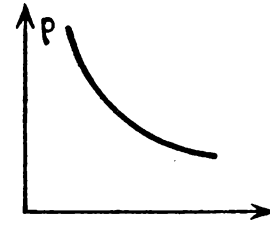


Fig. 2-9
Semi-Conducteur

b) SEMI-CONDUCTEUR.

La loi de variation de la résistivité en fonction de la température peut s'écrire :

$$\rho_t = \rho_0 e^{\alpha t}$$

avec $\alpha = -\frac{B}{T^2}$

(1) La relation est conservée en remplaçant la variation relative de la résistivité par la variation relative de résistance et on a

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta t} .$$

e : base des logarithmes népériens = 2,718...
t : température en degrés Celsius ;
B : constante qui dépend de la nature du matériau.
T : température en degrés Kelvin = 273 °C + t.

Le coefficient de température α est négatif pour les semi-conducteurs. Si nous traçons la courbe qui représente la variation de la résistivité en fonction de la température on obtient une exponentielle (fig. 2-9).

c) Isolant.

La résistivité transversale des isolants diminue le plus souvent quand la température augmente mais il n'y a pas de loi générale.

Exemple : Le caoutchouc a une résistivité transversale de 32 000 TΩ cm à 0 °C et elle tombe à 7 500 TΩ cm à 24 °C.

Le coefficient de température est variable avec la température mais il peut être défini et considéré comme constant dans un intervalle de températures peu élevé.

Exemple : $\alpha = -750 \times 10^{-6}$ par degré Celsius de — 25 à + 75 °C.

3° Résistivité superficielle. — Pour les isolants on définit une résistivité superficielle car l'isolement varie en surface avec les poussières et surtout l'humidité. La résistivité en surface peut diminuer beaucoup si le corps est poreux et absorbe l'humidité.

L'ébonite par exemple a une résistivité superficielle qui passe de 10^{12} Ω m à 20 % d'humidité à 10^{8} Ω m à 80 % d'humidité suivant le milieu dans lequel elle est placée.

Par contre d'autres substances comme la cérésine, la paraffine ou les silicones ont une résistivité superficielle élevée qui reste constante quel que soit le pourcentage d'humidité de l'atmosphère dans laquelle elles sont placées. Ces corps ne mouillent pas et n'absorbent pas l'humidité d'où leur utilisation comme produits d'imprégnation.

C) Pertes par effet Joule.

Appelées encore pertes ohmiques ou pertes par conduction.

Lorsqu'un conducteur est parcouru par un courant électrique il s'échauffe. La production de chaleur est due aux chocs des électrons sur les atomes, qui constituent le conducteur. L'énergie électrique se transforme en énergie calorifique qui correspond à une augmentation de vibrations des atomes.

La puissance dissipée en chaleur dans une résistance R a pour valeur :

$$P = R I^2 = U I$$

L'énergie dépensée et par conséquent la quantité de chaleur produite pendant le temps t, ont pour valeur :

$$W = R I^2 t$$

P en watts ; R en ohms, I en ampères, U en volts, t en secondes, W et Q en joules.

En calories, la quantité de chaleur produite s'écrit :

$$Q = 0{,}24\ RI^2 t \text{ calories.}$$

Il faut noter que les valeurs de P, W et Q dépendent de la température puisque la résistance varie avec la température.

En alternatif, il faut utiliser dans les formules ci-dessus les tensions et les intensités efficaces :

$$U_{eff} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \qquad \text{et} \qquad I_{eff} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

U_m et I_m correspondent aux tension et intensité maximales.

Si l'effet Joule produit dans les conducteurs un échauffement nuisible et s'il provoque une dépense inutile d'énergie, il a tout de même des applications importantes : chauffage électrique, soudage par résistance, fusibles et éclairage par incandescence.

D) Pertes par courants de Foucault.

Les courants de Foucault sont des courants induits à l'intérieur des masses conductrices par des variations d'induction magnétique.

Ces courants peuvent être produits dans les conducteurs eux-mêmes mais surtout dans les masses conductrices voisines (noyaux, blindages, chassis).

Les pertes par courants de Foucault sont *proportionnelles au carré de la fréquence* et prennent une importance particulière en HF. L'effet Joule qui en résulte produit un échauffement nuisible et une dépense inutile d'énergie. Ces pertes s'expriment en W/kg.

Les courants de Foucault ont trouvé une application importante dans le chauffage par haute fréquence qui est utilisé entre autres, pour la trempe superficielle des aciers et pour le dégazage des électrodes de tubes électroniques en cours de fabrication.

E) Pertes par effet pelliculaire.
ou effet Kelvin.

L'effet pelliculaire correspond à une inégale répartition des courants variables dans les conducteurs massifs avec augmentation de la densité du courant au voisinage de la surface. Son influence se fait surtout sentir pour des fréquences supérieures à 100 kHz. Elle se traduit par une augmentation de la résistance puisque le courant ne circule plus en pratique que dans une partie de la section du conducteur.

On exprime l'effet pelliculaire par le rapport de la résistance en HF et de la résistance en courant continu.

$$p = R_{HF}/R_{CC}.$$

Les pertes par effet pelliculaire sont sensiblement proportionnelles à la racine carrée de la fréquence. Pour le cuivre, l'épaisseur superficielle e où circulent les courants HF est donnée par $e = 66/\sqrt{f}$ (f en Hz et e en mm).

III. PROPRIÉTÉS DU DOMAINE DU MAGNÉTISME.

A) Définitions.

1° Magnétisme. — Il traite des champs magnétiques et des corps soumis à leur action.

2° Champ magnétique (H). — Au sens qualitatif, c'est une région de l'espace où il existe un état magnétique susceptible de se traduire par des forces.

Au sens quantitatif, le champ magnétique est une grandeur vectorielle axiale qui partage avec l'induction magnétique le rôle de caractériser en tout point de l'espace un champ magnétique.

Dans le système *SI*, la valeur d'un champ magnétique s'exprime en ampère par mètre : A/m. (1 millioersted = 0,08 A/m).

3° Induction magnétique (B). — L'induction magnétique, dans un milieu donné, est une grandeur vectorielle axiale, proportionnelle au champ magnétique qui lui a donné naissance.

Dans le système *SI*, elle s'exprime en teslas (T) (1 T = 1 Wb/m^2 = 10^4 gauss).

4° Substance ferromagnétique : Substance capable de prendre une aimantation importante dans un champ magnétisant et susceptible de conserver tout ou partie de cette aimantation après cessation de l'action de ce champ.

5° Aimant permanent : Corps ferromagnétique qui entretient un champ magnétique sans intervention d'un courant électrique.

B) Perméabilité.

La *perméabilité absolue* μ d'une substance est le quotient de l'induction par le champ magnétique qui la produit d'où :

$$B = \mu H \quad (B \text{ en T}, \mu \text{ en H/m}, H \text{ en A/m}).$$

La *perméabilité relative* μ_r est le rapport de la perméabilité absolue à celle du vide μ_0 :

$$\mu_r = \mu/\mu_0 \text{ (nombre pur)},$$

d'où

$$\boxed{B = \mu_0 \mu_r H}$$

La perméabilité augmente dans le sens du laminage et diminue avec la trempe.

La *perméabilité du vide* (ou constante magnétique du vide) a pour valeur $\mu_0 = 4\pi . 10^{-7}$ H/m dans le système *SI*.

La valeur de la perméabilité (1) maximale que l'on peut obtenir pour une substance ferromagnétique marque l'aptitude de la substance à s'aimanter (voir chapitre 3) :

Fer doux, $\mu_{r\ max} = 10\,000$;
Mumétal, $\mu_{r\ max} \approx 100\,000$.

C) Courbe de première aimantation.

Si l'on soumet une substance ferromagnétique qui n'a jamais été aimantée à un champ constamment croissant, la courbe qui traduit l'induction en fonction du champ est celle de la fig. 2-11, dite courbe de première aimantation.

Cette courbe montre que la perméabilité absolue varie en fonction du champ appliqué. Sa valeur est égale à la tangente de l'angle α au point considéré.

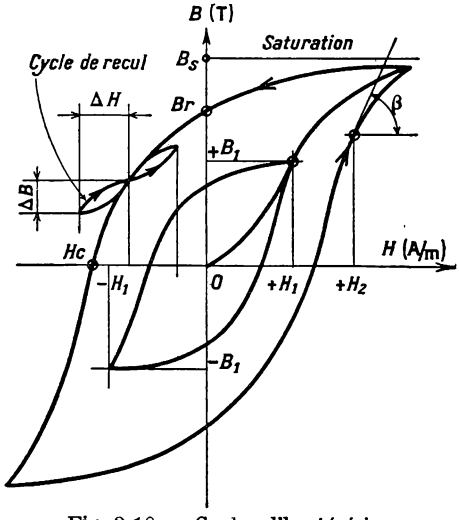


Fig. 2-10 — Cycles d'hystérésis

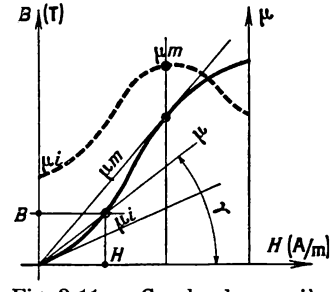


Fig. 2-11 — Courbe de première aimantation.

Perméabilité initiale μ_i : celle obtenue en menant par l'origine la tangente à la courbe. Elle est d'autant plus grande que le cycle d'hystérésis est étroit.

Perméabilité maximale μ_m : celle obtenue lorsque l'angle α est maximal.

D) Cycle d'hystérésis.

C'est la courbe fermée donnant la suite des valeurs de l'induction magnétique dans un corps ferromagnétique, lorsque le champ magnétisant subit une variation périodique (fig. 2-10). Cette figure montre deux cycles obtenus avec deux champs alternatifs lentement variables. Les pointes positives des boucles se déplacent sur la courbe d'aimantation initiale.

Induction à saturation B_s : celle obtenue lorsque pour un champ suffisant l'induction devient indépendante de ce champ.

Perméabilité différentielle μ_d : c'est la variation élémentaire de l'induction par la variation correspondante du champ magnétique. Sa valeur est égale à la tangente de l'angle β au point considéré.

(1) Lorsque le terme perméabilité est utilisé seul, il s'agit de la perméabilité relative.

Perméabilité dynamique $\mu\Delta$: c'est l'amplitude de la variation d'induction par l'amplitude de la variation correspondante du champ lorsque l'on superpose un champ magnétique alternatif à un champ continu. Elle est mesurée sur le cycle de recul ($\mu\Delta = \Delta B/\Delta H$).

E) Courbe de désaimantation.

Elle correspond au quart supérieur gauche du cycle d'hystérésis (fig. 2-12).

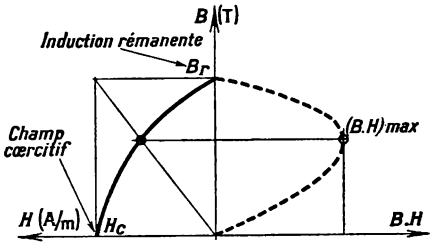


Fig. 2-12
Courbe de désaimantation

Lorsque le champ s'annule il subsiste une induction dite rémanente qui correspond à une aimantation résiduelle ou rémanente.

Pour ramener l'induction à une valeur nulle, il faut amener le champ à une certaine valeur qui est appelée champ coercitif.

Le point $(B.H)_{max}$ est un critère important pour estimer la qualité d'un matériau pour aimant permanent.

F) Point de Curie.

Lorsqu'on chauffe une substance ferromagnétique, son induction à saturation décroît et s'annule pour une température appelée point de Curie (770 °C pour le fer). La substance ne peut pas être aimantée au-dessus de cette température.

Certains matériaux (Alcomax, Ticonal) après chauffage au delà du point de Curie et refroidis sous champ magnétique présentent à température ordinaire, une anisotropie magnétique avec des propriétés améliorées dans la direction du champ.

G) Pertes par hystérésis.

L'hystérésis magnétique est un phénomène par lequel l'aimantation des corps ferromagnétiques dépend non seulement de la valeur actuelle du champ, mais aussi des états magnétiques antérieurs.

La modification de l'état magnétique de la substance qui se fait avec un certain retard (traînage) dépendant de la vitesse de variation du champ donne lieu a une dépense d'énergie qui se retrouve sous forme de chaleur.

Les pertes d'énergie appelées pertes par hystérésis sont *proportionnelles à la fréquence* et à la surface du cycle d'hystérésis.

L'énergie perdue par hystérésis est donnée par les formules suivantes :

$$W = \eta\, P\, f\, B_m^{1,6} \quad \text{pour le fer doux,}$$

$$W = \eta\, P\, f\, B_m^{2} \quad \text{pour les aciers au silicium,}$$

η : coefficient proportionnel à la surface du cycle d'hystérésis,

P : poids f : fréquence B_m : induction maximale

IV. PERTES DANS LES BOBINAGES ET CONDENSATEURS.

Les pertes que nous avons examinées aux paragraphes précédents sont :

— les pertes par conduction,
— les pertes par courants de Foucault, proportionnelles à f^2,
— les pertes diélectriques proportionnelles à f,
— les pertes par effet pelliculaire proportionnelles à $\sqrt{f}$,
— les pertes par hystérésis magnétique proportionnelles à f.

Il existe encore d'autres pertes parmi lesquelles on peut citer les pertes par « capacité répartie » des inductances. (Chaque spire formant avec la suivante les armatures d'un condensateur séparées par un diélectrique constitué par l'ioslant entre spires) et les pertes par rayonnement électromagnétique qui sont généralement négligeables.

Ces pertes sont diverses suivant qu'il s'agit d'un bobinage ou d'un condensateur sont résumées dans les tableaux suivants avec les remèdes qui y sont apportés.

BOBINAGES

Pertes dans les conducteurs appelées communément : pertes dans le cuivre	
Pertes par conduction.	Choisir un métal à faible résistivité (Cuivre, aluminium).
Pertes par courants de Foucault.	Espacer les spires.
Pertes par effet pelliculaire (HF seulement)	Utiliser du fil divisé et en émission des tubes ou des rubans.
Pertes dans les noyaux appelées communément : pertes dans le fer	
Pertes par courants de Foucault. Pertes par hystérésis.	Utiliser des tôles feuilletées en BF et du fer divisé ou des ferrites en HF. Employer des matériaux ayant un cycle d'hystérésis étroit (Aciers au silicium ou au nickel).
Pertes dans les isolants.	Choisir des isolants ayant de faibles pertes, une grande résistivité, peu sensibles à l'humidité et les protéger par imprégnation.
Pertes par capacité répartie. (HF seulement)	Aérer les bobinages s'il y a peu de spires. Utiliser le type de bobinage en « nid d'abeilles » lorsqu'il y a de nombreuses spires.
Pertes dans les pièces voisines par courants de Faucault.	Espacer les pièces voisines, les blindages d'une quantité au moins égale au diamètre des bobines.

CONDENSATEURS

Pertes par conduction.	Choisir un métal à faible résistivité (cuivre, aluminium, argent). Diminuer la longueur des connexions. Réaliser de bonnes soudures.
Pertes dans les isolants.	Utiliser des diélectriques et isolants ayant de faibles pertes, une grande résistivité et peu sensibles à l'humidité. Protéger l'ensemble par imprégnation.

V. FACTEUR DE PERTES.

A) Définitions.

— *Angle de déphasage* φ (*ou argument*). Si nous considérons un élément de circuit possédant de l'inductance ou de la capacité et que l'on représente à l'instant t, la tension aux bornes de cet élément et l'intensité qui le traverse par des vecteurs, ces vecteurs sont déphasés d'un certain angle φ.

— *Facteur de surtension ou facteur de qualité* : tg φ. C'est la tangente de l'angle de déphasage. Plus les pertes sont faibles, meilleur est le facteur de qualité.

— *Angle de pertes* δ : c'est le complément de l'angle de déphasage, c'est-à-dire le complément de l'angle formé par les vecteurs U et I.

— *Facteur de pertes* : tg δ. C'est la tangente de l'angle de pertes qui est quelquefois exprimée en % et appelée indice de pertes.

Dans les chapitres suivants, l'une des qualités des matérieux utilisés sera exprimée par le facteur de pertes. Il est d'autant plus faible que les pertes sont faibles. Il y a lieu étant donné sa variation avec la fréquence de préciser à quelle fréquence sa valeur a été mesurée.

B) Facteur de pertes pour une inductance et un condensateur.

Une bobine parfaite est définie par son seul coefficient d'auto-induction (L). La tension à ses bornes est déphasée de $\pi/2$ en avance sur l'intensité.

Un condensateur parfait est défini par sa seule capacité (C). La tension à ses bornes est déphasée de $\pi/2$ en retard sur l'intensité.

En réalité, ces éléments ne sont pas parfaits et les pertes qui leurs sont associées peuvent toujours être représentées par une résistance en série et la tension n'est plus déphasée de $\pi/2$ sur l'intensité mais d'un angle $\varphi < \pi/2$, le complément étant l'angle de pertes.

L'ensemble des données précédentes est résumé dans le tableau ci-après fig. 2-13 à 2-20).

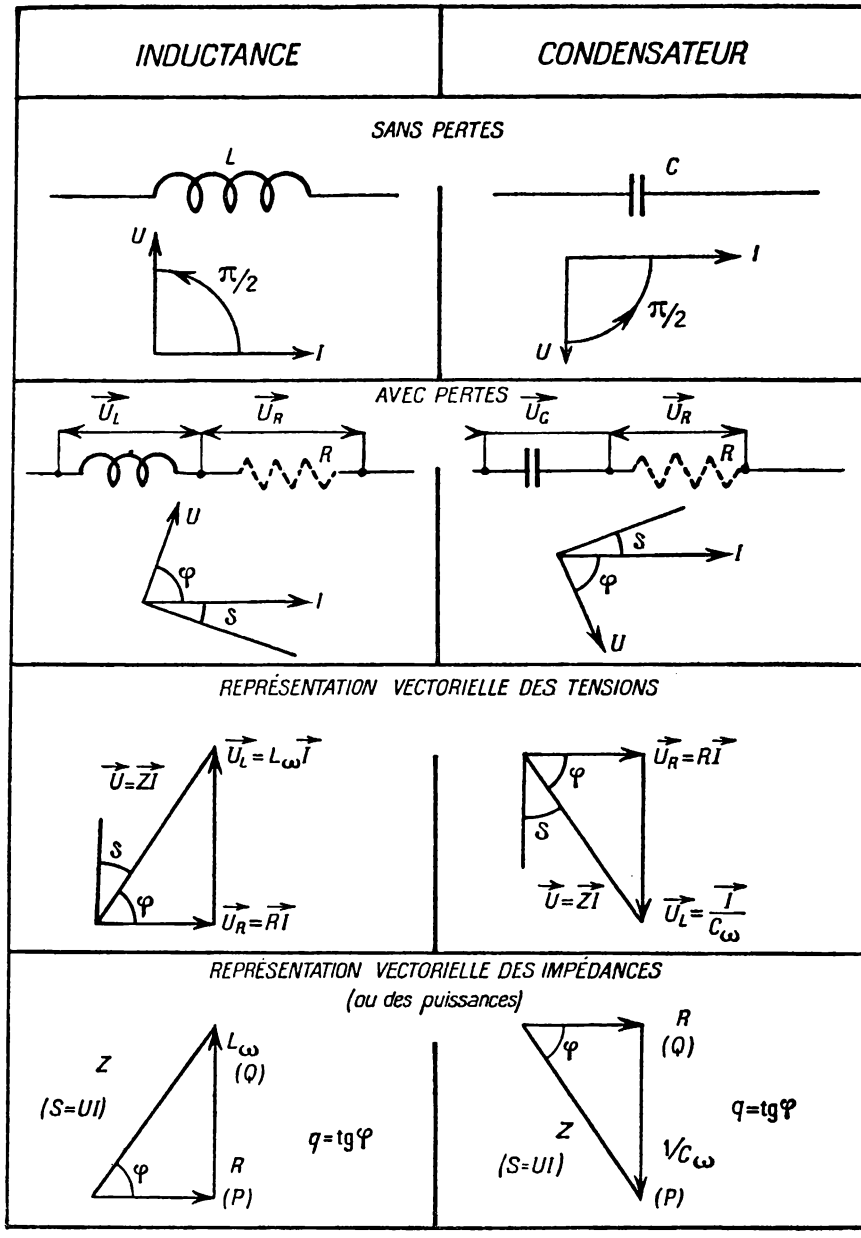

INDUCTANCE
CONDENSATEUR
SANS PERTES
L
C
U
π/2
I
I
π/2
U
AVEC PERTES
$\vec{U_L}$
$\vec{U_R}$
$\vec{U_C}$
$\vec{U_R}$
R
R
U
φ
I
δ
δ
I
φ
U
REPRÉSENTATION VECTORIELLE DES TENSIONS
$\vec{U}=\vec{ZI}$
$\vec{U_L}=L\omega\vec{I}$
δ
φ
$\vec{U_R}=\vec{RI}$
$\vec{U_R}=\vec{RI}$
φ
δ
$\vec{U}=\vec{ZI}$
$\vec{U_L}=\frac{\vec{I}}{C\omega}$
REPRÉSENTATION VECTORIELLE DES IMPÉDANCES
(ou des puissances)
Z
(S=UI)
$L\omega$
(Q)
φ
R
(P)
q=tgφ
φ
R
(Q)
Z
(S=UI)
$1/C\omega$
(P)
q=tgφ

Fig. 2-13 à 2-20

Les termes non définis dans ce chapitre ainsi que l'explication des représentations graphiques doivent être cherchés dans un cours théorique.

U_L : Tension aux bornes de la bobine si elle était parfaite.
U_C : Tension aux bornes du condensateur s'il était parfait.
U_R : Tension aux bornes de la résistance série représentant les pertes.
U : Tension aux bornes de la bobine ou du condensateur avec pertes.
L : Induction propre de la bobine (en henrys, H),
C : Capacité du condensateur (en farads, F),
ω : Pulsation (en radians par seconde, rd/s), avec $\omega = 2\pi f$.
f : Fréquence (en hertz, Hz).
$L\omega$: Réactance de la bobine (en ohms, Ω).
$\frac{1}{C\omega}$: Réactance du condensateur (en ohms, Ω).
Z : Impédance du circuit (en ohms, Ω),
— pour la bobine $Z = \sqrt{R^2 + L^2\,\omega^2}$,
— pour le condensateur $Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\,\omega^2}}$.
P : puissance active $P = UI \cos \varphi$ (en watts, W). Ici elle correspond à la puissance perdue.
Q : Puissance réactive, $Q = UI \sin \varphi$.
S : Puissance apparente, $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$.
φ : Angle de déphasage (en radians, rd).
δ : Angle de pertes (en radians, rd).
q : Facteur de qualité ou facteur de surtension $q = \operatorname{tg} \varphi$, ce qui donne pour un condensateur : $q = \frac{1}{RC\omega}$, et pour une inductance : $q = \frac{L\omega}{R}$.

VI. NORMES.

UTE C 26-215. Résistivité transversale et résistivité superficielle (1959).
UTE C 26-220. Résistance aux courants de cheminement par la méthode des gouttes conductrices (1960).
UTE C 26-225. Mesure de la rigidité diélectrique (1961).

CHAPITRE 3

LES CONDUCTEURS

1. GÉNÉRALITÉS.

Un conducteur est une substance ou un corps pouvant donner passage continu à un courant électrique.

Les propriétés électriques et magnétiques des conducteurs ont été examinées au deuxième chapitre (résistivité, coefficient de température, pertes, perméabilité...).

Dans la construction du matériel électrique, d'autres propriétés doivent être prises en considération pour faire un choix judicieux du matériau. Les principales propriétés sont :

1° Propriétés électriques : Voir deuxième chapitre.

2° Propriétés mécaniques : Limite élastique (R_e, en daN/mm²) (¹), charge de rupture (R, en daN/mm²), allongement % (A), résilience (K, en daJ/cm²), dureté (H), résistance à l'usure.

3° Propriétés physiques : Densité, homogénéité, dilatabilité, conductibilité thermique.

4° Propriétés chimiques : Résistance aux agents chimiques et en particulier résistance à l'oxydation.

5° Propriétés métallurgiques : Température de fusion, fluidité, malléabilité, ductilité, soudabilité.

6° Propriétés commerciales : Prix de revient, facilité d'approvisionnement, facilité de transport.

(¹) Dans le système international 1 daN/mm² $\approx$ 1 kgf/mm².

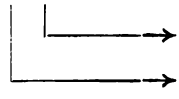
II. DÉSIGNATIONS NORMALISÉES

A) Métaux ferreux.

1° Les fontes

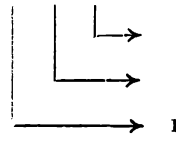
a) FONTES GRISES.

Fonte Ft 18



b) FONTES MALLÉABLES.

Fonte MB 35-10

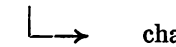


Pour une fonte malléable à cœur noir utiliser la symbolisation MN.

2° Les aciers.

a) ACIERS D'USAGE COURANT.

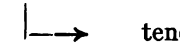
Acier A 48



La désignation est suivie éventuellement d'un chiffre (1 à 4) repérant la qualité et d'une lettre (*b* à *g*) repérant l'indice de pureté en soufre et en phosphore.

b) ACIERS NON ALLIÉS POUR TRAITEMENTS THERMIQUES.

Acier C 28

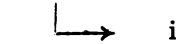


Lorsque la tolérance de la teneur en carbone est plus étroite, la désignation est précédée de la lettre X. Les aciers de cette série s'appellent des aciers fins (exemple : Acier XC18).

La désignation est suivie éventuellement d'un indice de pureté repéré par une lettre minuscule (d à m).

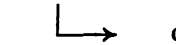
c) ACIERS NON ALLIÉS DE QUALITÉ SOUDABLE.

Acier A 48 S



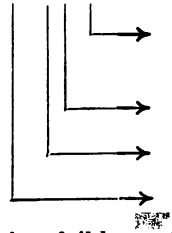
d) ACIERS NON ALLIÉS DE QUALITÉ MOULABLE.

Acier A 48 M



e) Aciers faiblement alliés.

Acier 40 CD 4



- teneur de l'élément principal compte tenu d'un coefficient,
- molybdène,
- chrome (élément principal),
- teneur moyenne de carbone en dix millièmes.

Les aciers faiblement alliés sont ceux dans lesquels aucun élément d'addition n'atteint la teneur de 5 %.

Les symboles abrégés ont été choisis de préférence aux symboles chimiques car leur brièveté présente des avantages du point de vue marquage et désignation écrite ou verbale.

Tableau 3.1. — Symboles les plus courants :

Aluminium	A	Etain	E	Phosphore	P
Béryllium	Be	Magnésium	G	Silicium	S
Chrome	C	Manganèse	M	Tungstène	W
Cobalt	K	Molybdène	D	Vanadium	V
Cuivre	*U*	Nickel	N	Zinc	Z

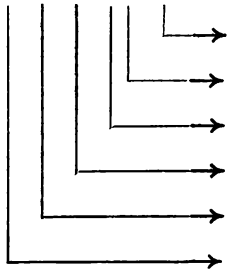
Pour obtenir la teneur de l'élément principal, diviser le nombre final par 4 dans le cas des métaux suivants : chrome, cobalt, manganèse, nickel, silicium. Pour les éléments d'addition autres que ceux-ci diviser par 10.

Les aciers alliés peuvent comporter une petite lettre (a à m) qui suit leur désignation et indique l'indice de pureté.

f) Aciers fortement alliés.

Les aciers fortement alliés sont ceux dans lesquels un élément d'addition au moins atteint la teneur de 5 %. La désignation est précédée de la lettre Z.

Acier Z 90 K CW 15



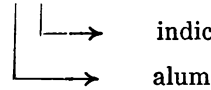
- 15 % de cobalt,
- tungstène,
- chrome,
- cobalt,
- 0,9 % de carbone,
- acier fortement allié.

Les chiffres qui terminent la désignation et qui sont rangés dans le même ordre que les symboles correspondants expriment la teneur moyenne en « pour cent » des éléments d'alliage.

B) Métaux non ferreux.

1° Métaux de base.

Aluminium A 9

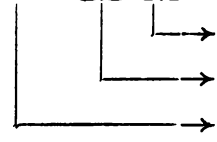


L'indice de pureté chimique représenté par un chiffre (0 à 9) a une valeur qui augmente suivant un échelonnement particulier à chaque métal.

Les symboles abrégés utilisés sont les mêmes que ceux utilisés pour les aciers alliés.

2° Alliages.

Maillechort U — N 26 Z 17



Les teneurs moyennes sont arrondies à l'unité la plus voisine.

III. LE FER ET SES ALLIAGES.

A) Origine.

Les minerais qui se trouvent dans la nature à l'état d'oxydes (hématite rouge, fer oligiste) de sulfures (pyrites) sont traités avec du coke dans les hauts fourneaux pour donner la fonte de première fusion. Pour obtenir du fer, il faut la débarrasser de son excès de carbone par oxydation dans divers appareils (convertisseur, acier à l'oxygène, four Martin, four électrique).

B) Propriétés.

Le fer est un métal ayant pour masse volumique 7,86 kg/dm^3. Il fond à 1 500 °C. Il est magnétique et se corrode facilement en donnant avec l'oxygène de l'air des hydroxydes poreux qui permettent à l'oxydation de se poursuivre. Sa résistivité est moyenne ($\rho = 9{,}06\ \mu\Omega$ cm). Il ne porte l'appellation fer que si la teneur en carbone est inférieure à 0,05 %. Il est très malléable. Les propriétés magnétiques du fer doux dépendent des impuretés qui doivent être éliminées au maximum, et des contraintes internes qui doivent être très faibles (traitement thermique).

C) Utilisations.

1° Les fers doux à caractéristiques magnétiques tels que le Ferimphy FD sont élaborés au four électrique à arc, procédé qui permet d'avoir une grande pureté. Un recuit d'une heure à 850 °C en atmosphère neutre leur confère les caractéristiques magnétiques nécessaires.

Leur perméabilité importante atteint 10 000 et l'induction de saturation 1,5 tesla. Ces qualités sont utilisées dans les applications à flux constant telles que les pièces polaires d'électro-aimant, plaques d'écouteurs téléphoniques, noyaux de relais.

Par contre leur faible résistivité s'avère être un obstacle important en alternatif à cause des pertes par courants de Foucault.

2° Le fer doux Ferimphy FF, élaboré de la même façon que ci-dessus, correspond à des coulées de fer pur ayant une excellente aptitude à l'emboutissage profond.

3° Afin d'obtenir une résistivité élevée, ce qui diminue les pertes par courants de Foucault et permet l'utilisation en HF, on emploie du fer pulvérulent. Les poudres très fines (diamètres 10 μ environ) obtenues à partir de fer pentacarbonyle $Fe(CO)_5$ chauffé sont agglomérées par des résines thermodurcissables. On obtient ainsi des noyaux magnétiques HF en « fer divisé ».

D) Alliages fer-carbone.

1° Fontes.

Ce sont des alliages contenant entre 1,7 et 6,7 % de carbone. Leur résistance à la traction est faible. Par contre, elles résistent bien à la compression. La présence de graphite leur donne de bonnes qualités frottantes et augmente l'amortissement des vibrations.

Elles ont un point de fusion moins élevé que les aciers et une bonne coulabilité. Elles peuvent subir la nitruration pour améliorer leur dureté superficielle.

La résistance des fontes peut être augmentée par traitement spécial (fontes malléables), par addition de magnésium (fontes à graphite sphéroïdal) ou par addition d'autres métaux (fontes alliées, en particulier fonte au nickel amagnétique).

— *Utilisations.* — Bâtis, supports, colonnes, paliers, accouplements.

2° Aciers pour mécanique générale.

Leur titre en carbone est compris entre 0,05 et 1,7 %. Ils offrent une grande résistance aux diverses sollicitations. Leurs qualités superficielles en particulier la dureté peuvent être grandement améliorées par certains traitements : nitruration et cémentation sur les aciers doux, trempe sur les aciers durs. Les aciers doux se soudent très bien. Les aciers doux et mi-durs peuvent être moulés. Les procédés de fabrication applicables aux aciers sont extrêmement nombreux. Les procédés par déformation des tôles (pliage, roulage, découpage, emboutissage) ainsi que le décolletage sont très utilisés dans le matériel électronique. Pour la protection climatique, la lutte contre l'oxydation et la corrosion, plusieurs méthodes peuvent être utilisées : nickelage, chromage, cadmiage, zinguage, etc...

TABLEAU 3.2. — ALLIAGES FERREUX

ACIERS NON ALLIÉS

Nuances		Extra-doux		Doux		Demi-dur		Dur		Extra dur
Aciers d'usage courant	A Dx	A 33	A 37	A 42	A 48	A 56	A 65	A 75	A 85	A 95
Aciers soudables		A 33 S	A 37 S	A 42 S	A 48 S					
Aciers moulés				A 42 M	A 48 M	A 56 M	A 65 M			
Aciers pour traitements thermiques		C 10	C 11	C 20	C 28	C 35	C 45	C 55		
		XC 10	XC 12	XC 18	XC 25	XC 35	XC 45	XC 55	XC 65	XC 80
		Nitruration	Cémentation			Trempe				

Choix d'ACIERS ALLIÉS

Trempants 1/2 durs	30 NC 11	R = 85 daN/mm²	Décolletage	35 MF 4
	20 CD 4	105 »	Haute limite élastique	45 SC 7
Trempants durs	40 CD 4	120 »	Inoxydable à froid	Z 12 CN 18-08
	35 NC 6	135 »	Inoxydable à chaud	Z 8 CNT 18
Trempant extra-dur	100 C 5	H_{RC} > 61	Réfractaire	Z 40 CSD 10
Auto-trempant	40 NC 17	180 »	Amagnétique	Z 30 NC 22
Pour cémentation	12 CD 4	100 »	Aimants ordinaires	Z 70 W 6
	16 NC 6	120 »	Aimants de qualité	Z 90 KCW 15
Pour nitruration	Z 40 CAD 6-06	H_V = 1 100	Résistances électriques	Z 10 CA 22-06
Soudable	20 CD 4	55 »	Indilatable	Z 50 N 36

FONTES

Fontes ordinaires			à haute R		à cœur blanc		Malléables à cœur noir			
Ft 14	Ft 18	Ft 22	Ft 26	Ft 30	MB 35-5	MB 35-10	MN 35-5	MN 35-10	MN 38-10	MN 38-15

Nota : Les trois aciers non alliés pour traitements dont les symboles sont dans un cadre renforcé sont recommandés par la norme.

Des additions de métaux peuvent modifier considérablement les caractéristiques mécaniques ou électriques des aciers. On obtient des aciers alliés parmi lesquels on peut citer les aciers inoxydables, les aciers à aimants (voir § D 4°), les aciers indilatables, les ferro-alliages (voir § D 3°).

a) Aciers non alliés.

Toutes pièces devant être résistantes, bon marché et ne demandant pas de qualités électriques spéciales telles que boîtier de potentiomètre, châssis de matériel radioélectrique, bâti de condensateur variable, axes de commande, visserie, boulonnerie, carcasse de haut-parleur.

b) Aciers alliés pour traitements.

Ce sont des aciers au chrome, nickel chrome ou chrome molybdène qui subissent une trempe, une cémentation ou une nitruration. Ils sont utilisés pour des pièces à haute résistance et grande dureté : axes, pivots, billes, engrenages.

c) Aciers inoxydables.

Ce sont des aciers au nickel chrome dont le plus connu (acier 18-8) contient 18 % de chrome et 8 % de nickel.

Leur prix de revient est élevé. Ils ne sont employés que dans des cas particuliers, là où la corrosion peut nuire aux autres qualités : visserie inoxydable, poignées, tubes protecteurs, bandes de magnétophone (1).

3° Aciers au silicium.

L'addition de 3 % de silicium réduit les pertes totales dans un rapport de deux ou trois. Cette réduction est due d'une part à l'accroissement de la résistivité qui entraîne une diminution des pertes par courants de Foucault et d'autre part à l'augmentation de la perméabilité qui réduit les pertes par hystérésis. Par contre le silicium augmente beaucoup la fragilité.

1° Les tôles ordinaires sont obtenues par laminage à chaud. Elles sont dites « supérieures » si la teneur en silicium est inférieure à 3 % (pertes comprises entre 1,6 et 2,6 W/kg pour $B = 1$ Wb/m^2) et « extra supérieures » si la teneur en silicium est supérieure à 3 % (pertes inférieures à 1,6 W/kg pour $B = 1$ Wb/m^2). Exemple : alliage HPM contenant 4 % de silicium.

2° Le laminage à froid permet d'obtenir des rubans à cristaux orientés dans la direction du laminage et présentant une direction de facile aimantation. Un recuit (2) sous champ magnétique donne un cycle d'hystérésis rectangulaire. Les aciers « Hipersil » (U.S.A.) ou « Imphysil » (France) obtenus par ce procédé ont des pertes inférieures à 0,6 W/kg pour $B = 1$ tesla à 50 Hz dans le sens du laminage. La perméabilité maximale dépasse 35 000.

Utilisations. — Tôles pour transformateurs d'alimentation et pour inductances BF.

(1) Normalement l'acier « inox 18-8 » n'est pas magnétique mais le travail à froid donne naissance à une aimantation liée à la formation de petites particules de ferrite magnétique dispersées dans la masse.

(2) Le recuit doit s'effectuer après découpage dans des fours spéciaux en atmosphère contrôlée.

4° Aciers au nickel.

Ce sont des alliages à très faibles pertes qui ont des perméabilités initiale et maximale élevées.

Leur prix de revient est plus élevé que celui des aciers au silicium mais ils permettent la réalisation d'appareils magnétiques à hautes performances. Certains alliages de cette famille possèdent des propriétés spéciales telles que perméabilité constante ou rectangularité du cycle d'hystérésis.

a) ALLIAGES A GRANDE PERMÉABILITÉ INITIALE :

Mumétal ; Permalloy C.

Ce sont des alliages binaires comprenant de 75 à 80 % de nickel.

La perméabilité initiale peut atteindre 20 000, et la perméabilité maximale 100 000. Ils ont un cycle d'hystérésis très étroit ainsi qu'une résistivité élevées, donc de faibles pertes par courants de Foucault.

Les propriétés ci-dessus sont encore améliorées par l'addition de molybdène (Supermalloy, Mumétal au Mo) ou de cuivre (Alliage 1040). Des perméabilités initiales de 100 000 ont pu être obtenues dans les transformateurs.

Utilisations. — Dans les transformateurs BF à large bande passante, inductances, relais à grande vitesse, pick-ups magnétiques, blindages magnétiques pour transformateurs, inductances ou tubes cathodiques.

b) ALLIAGES A INDUCTION DE SATURATION ÉLEVÉE :

Anhyster C et D, Permalloy B, Radiométal, Hipernic.

Ce sont des alliages binaires contenant de 45 à 50 % de nickel.

Le laminage à froid permet pour ces alliages d'orienter les grains afin d'obtenir une direction de facile aimantation. Leurs propriétés sont analogues à celles des aciers au silicium à grains orientés.

Utilisations. — Dans les petits transformateurs de puissance BF, comme noyaux de bobines d'inductances de relais, etc..., avec des aimantations continue et alternative superposées.

c) ALLIAGES A CYCLES D'HYSTÉRÉSIS RECTANGULAIRE :

Rectimphy, Permalloy F.

Ces alliages qui contiennent environ 65 % de nickel subissent un recuit sous champ magnétique pour donner ce que l'on appelle des alliages à « domaines » (1) orientés qui ont un cycle d'hystérésis très rectangulaire, un faible champ coercitif et des pertes hystérétiques faibles.

Utilisations. — Dans les amplificateurs magnétiques, les mémoires magnétiques, les générateurs magnétiques d'impulsions, les transformateurs d'intensité.

(1) Domaines de Weiss : les matériaux magnétiques sont divisés en petits volumes appelés domaines, saturés magnétiquement dans une direction particulière. Cette direction varie au hasard d'un domaine à l'autre.

d) Alliages de grande résistivité :

Anhyster B, Permalloy D, Rhometal.

Ils contiennent environ 35 % de nickel. Du fait de leur forte résistivité les pertes de Foucault sont réduites, même aux fréquences élevées. La perméabilité initiale varie très peu avec la fréquence.

Utilisations. — Ces propriétés trouvent des applications dans les générateurs HF, les transformateurs de blocking, les transformateurs d'impulsion, les inductances HF.

e) Alliages a perméabilité constante :

Permivar, Isoperm.

Un Permivar type contient 45 % de nickel, 30 % de fer et 25 % de cobalt. L'Isoperm contient du cuivre au lieu de cobalt. La perméabilité pour le Permivar est constante de l'ordre de 500 jusqu'à des valeurs du champ magnétique maximal de 160 A/m.

Utilisations. — Dans les transformateurs BF sans distorsion.

f) Alliages a point de Curie variable :

Alliage « NMHG » dont le point de Curie est variable suivant les nuances de — 5 °C à + 200 °C. Ils contiennent environ 30 % de nickel.

Utilisations. — Pour la compensation de systèmes d'aimants permanents ou d'électro-aimants dans lesquels le champ de l'entrefer tend à décroître quand la température s'élève (compteurs électriques et tachymétriques).

g) Alliages amagnétiques :

Amaninphy, Telphy.

Ce sont des alliages contenant 10 à 25 % de nickel avec du chrome ou du manganèse qui ont pour but d'abaisser le point de Curie en dessous de la température ambiante.

Utilisations. — Leurs principales applications sont les anneaux de blocage des cales pour rotors d'alternateurs, fils et rubans de fixation d'armatures, certaines pièces d'appareils de mesures.

h) Alliages a dilatation déterminée :

Parmi les nombreux ferronickels dont les coefficients de dilatation sont rigoureusement déterminés, un certain nombre ont une grande importance en électronique car ils peuvent être soudés au verre.

Les alliages soudables aux verres tendres sont la platinite contenant 48 % de nickel, l'A.S.V. alliage à 42 % de nickel et 6 % de chrome, le ferro-nickel à 42 % de nickel formant l'âme du Copperclad, l'extérieur étant constitué par une couche de cuivre.

Les alliages soudables aux verres durs qui contiennent 29 % de nickel et 17 % de cobalt tels que le Dilver P, Fernico ou Kovar.

TABLEAU 3.3. — MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES DOUX

	France	U.S.A.	Composition	μ_r max	B pour μ max (T)	Pertes à 50 Hz (W/kg)	Utilisations
Fer Doux	Ferimphy	Fer Armco	Fer pur	10 000	1	2 ($B_m = 1\frac{y}{m}$T)	Plaques d'écouteurs. Armatures d'électro-aimants. Relais.
Aciers au silicium	Qualité supérieure		Si < 3 %	4 000 à 6 000	0,8 à 1	1,6 < pertes < 3,6 (B_m = 1 T)	Moteurs et générateurs ordinaires à faible prix.
	Qualité extra-supérieure		Si > 3 %	> 5 000	< 0,8	< 1,6 (B_m = 1 T)	Transformateurs de puissance à haut rendement pour fréquences industrielles.
	H.P.M.		Si = 4 %	5 500	0,8	(B_m = 1 T)	
	Imphysil	Hypersil	Si = 3 % cristaux orientés	40 000 à 50 000	1,1	2,2 (B_m = 1,7 T)	Transformateurs d'alimentation à faible encombrement. Inductances.
Aciers au nickel	Mumétal	Permalloy C	Ni ≈ 80 %	70 000 à 130 000	0,2	0,12 (B_m = 1,5 T)	Transformateurs AF à large bande. Relais à grande vitesse. Pick-ups magnétiques. Blindages magnétiques.
	Mumétal au Mo	Supermalloy	Ni = 79 % Mo = 5 %	60 000 à 120 000	0,16	0,12 (B_m = 0,5 T)	
	Anhyster D	Permalloy B	Ni ≈ 50 % cristaux orientés	18 000 à 40 000	0,6	0,7 (B_m = 1 T)	Transformateurs d'adaptation pour fréquences acoustiques. Inductances.
	Rectimphy	Permalloy F	Ni ≈ 65 % domaines orientés	80 000 à 140 000	1,1	0,8 (B_m = 1,5 T)	Amplis et mémoires magnétiques. Générateurs d'impulsions.
	Anhyster B	Permalloy D	Ni ≈ 35 %	8 000 à 10 000	0,5	1,1 (B_m = 1 T)	Générateurs RF. Transformateurs d'impulsions, Transformateurs RF.
		Permivar	Ni ≈ 45 % + Co ou Cu	500 Alliage à μ constante			Transformateurs AF sans distorsion.
	N. M.H.G.		Ni = 30 %	Point de Curie variable de — 5 °C à + 200 °C suivant les nuances			Shunts magnétiques.
Aciers au cobalt	AFK	Permendur V	Co = 35 à 50 %	3 500	0,9	8 (B_m = 1,8 T)	Plaques d'écouteurs. Tôles pour petites machines tournantes.

Nota. — Les matériaux cités dans la colonne « France » sont fabriqués par la Société métallurgique d'Imphy.

Utilisations. — Ils sont utilisés dans la construction des tubes électroniques ou pour les « traversées » par perles de verre dans le matériel professionnel.

5° Aciers au cobalt.

Permandur V, Alliage AFK.

Ils ont une induction à saturation très élevée qui atteint 2,4 tesla, une perméabilité forte pour des champs de grande intensité et un point de Curie élevé. Leur prix de revient est élevé (35 à 50 % de cobalt).

Ils sont utilisés pour les diaphragmes d'écouteurs de téléphone ou en magnétostriction (1).

6° Aciers à aimants (2).

a) Qualités d'un bon aimant.

— *Induction rémanente* B_r élevée (voir figure 2-11).

— *Champ coercitif* H_c élevé. Il indique la résistance à la désaimantation.

— *Produit (B.H.) maximal élevé.* Il permet d'avoir un champ élevé dans l'entrefer pour un volume d'aimant donné. Rechercher des matériaux à courbe de désaimantation rectangulaire.

b) Aciers a base de carbure (aciers au tungstène ou au cobalt).

Ce sont des aciers alliés comportant 6 % de tungstène (Z 70 W 6).

Les performances ont été améliorées par l'utilisation du cobalt comme élément d'addition. Ils comportent 3, 6, 9, 15 ou 35 % de cobalt (exemple : Acier Z 90 KCW 15). Leurs qualités s'améliorent avec la teneur en cobalt. Les champs coercitifs obtenus vont de $0{,}53 \times 10^{-4}$ A/m à 2×10^{-4} A/m.

Un acier récent de qualité équivalente à l'acier au tungstène contient 4 % de chrome et 2 % de cobalt (Acier 100 CK16).

Ces aciers peuvent être obtenus par les méthodes normales : soit profilés au laminoir, soit coulés dans des moules en sable pour les formes compliquées. Après recuit l'usinage est possible. Certaines précautions doivent être prises à cause de leur grande fragilité.

La dureté physique de l'acier va de pair en général avec la dureté magnétique et les grands champs coercitifs ; ces propriétés étant dues à de fortes contraintes internes obtenues par la formation de carbures pendant le traitement thermique.

c) Aciers a l'aluminium.

Les aciers contenant du nickel et de l'aluminium en proportions convenables donnent des champs coercitifs près de deux fois plus grands que ceux de l'acier à 35 % de cobalt avec une énergie interne supérieure de 25 %. Les champs coercitifs obtenus vont de $3{,}8 \times 10^{-4}$ A/m à $5{,}4 \times 10^{-4}$ A/m. Ces

(1) Magnétostriction : phénomène dû à l'aimantation qui provoque des variations de dimensions.

(2) Voir aussi ferrites durs (chapitre 5).

TABLEAU 3.4. — MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES DURS

Type	Désignations normalisées	B rémanente (T)	Champ coercitif (A/m)	$(B.H)_{max}$ (J/m^3)
Acier au W	Z 70 W 6	1,05	$0{,}525 \times 10^4$	2 380
Acier au Co	Z 90 KCW 15	0,82	$1{,}43 \times 10^4$	4 930
Alni	Z 5 NA 25 — 12	0,56	$4{,}61 \times 10^4$	9 950
Alnico	Z 5 NAK 20 — 12 — 10	0,725	$4{,}46 \times 10^4$	13 500
Alcomax	Z 2 KNAU 24 refroidi sous champ magn.	1,24	$4{,}57 \times 10^4$	35 800
Ticonal	Z 5 KNAT 24 refroidi sous champ magn.	1,27	$5{,}09 \times 10^4$	39 800
Ferrite dur (Vectolite)	oxyde double de Fe, Co	0,16	7×10^4	4 000

Nota. — Les cycles d'hystérésis permettant de comparer les propriétés de quelques matériaux magnétiques sont représentés aux figures 3.1 à 3.4.

alliages sont connus sous le nom d'Alni (12 % d'aluminium, 24 à 32 % de nickel).

Une addition de cobalt permet d'obtenir une énergie interne 40 % supérieure à celle de l'Alni. On obtient l'Alnico (8 à 11 % d'aluminium, 17 à 20 % de nickel, 12 % de cobalt, 6 % de cuivre). Le point de Curie plus élevé permet d'utiliser ces aimants à de hautes températures.

Un refroidissement sous champ magnétique permet d'obtenir des alliages anisotropes. Ce traitement thermique donne une énergie interne supérieure de 10 à 15 % dans la direction du champ qui a été appliqué. Les alliages les plus importants qui subissent cette technique sont le Ticonal (14 % de nickel, 24 % de cobalt, 8 % d'aluminium), l'Alcomax (8 % d'aluminium, 24 % de cobalt, 11,5 à 13,5 % de nickel). Des additions de niobium et tantale permettent d'augmenter encore les qualités ainsi que le contrôle de la cristallisation pendant le refroidissement.

d) FABRICATION DES AIMANTS.

Ces alliages durs et fragiles ne peuvent pas être forgés et leur usinage est très difficile. Ils sont soit coulés et travaillés à la meule soit obtenus par « *concréfaction* » pour les grandes séries. Ce deuxième procédé consiste à

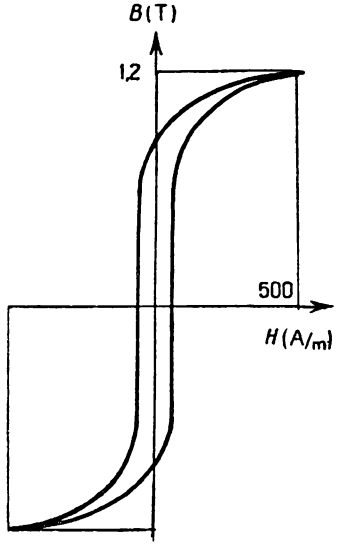


Fig. 3-1 Acier au silicium à 4 %

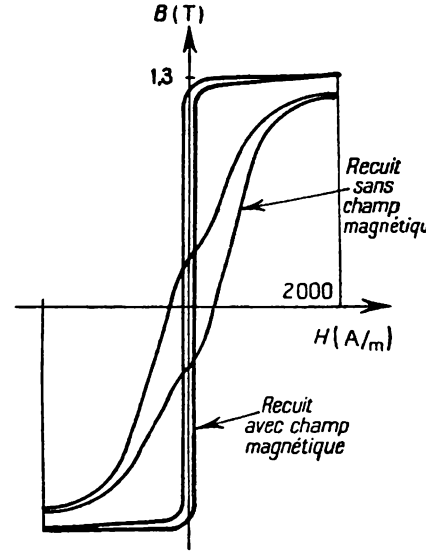


Fig. 3-2 Rectimphy

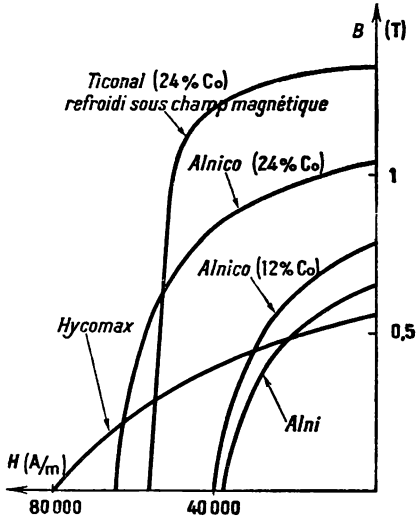


Fig. 3-3

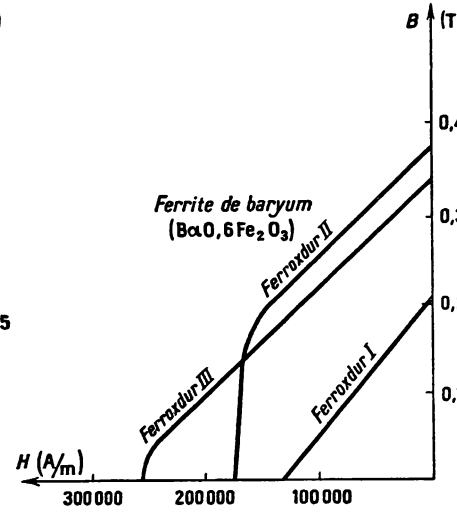


Fig. 3-4

Cycles d'hystérésis et courbes de désaimantation pour divers matériaux magnétiques

mélanger des poudres des différents constituants, à les comprimer et à les fritter. Le frittage est un chauffage à une température inférieure au point de fusion le plus élevé des constituants du mélange. Ce traitement amène des fusions partielles au sein du mélange avec diffusion des constituants ou recristallisation qui donnent aux pièces obtenues leur résistance. On obtient directement la forme à réaliser avec une précision suffisante ne nécessitant pas d'usinage. La concréfaction n'est économiquement valable que pour des petits aimants dont la masse ne dépasse par 20 grammes.

Les poudres peuvent être agglomérées par des résines thermodurcissables. La précision est augmentée mais au détriment de l'induction rémanente.

e) MANIPULATION DES AIMANTS.

Pour éviter des modifications dans les caractéristiques des aimants, la plupart d'entre eux sont livrés non aimantés. L'aimantation est réalisée au moment du montage sur appareil.

Un certain nombre de précautions doivent être prises pour manipuler les aimants aimantés. Ils doivent être bien séparés par des emballages en papier ou carton pour les petits aimants à flux de fuites faible. Une séparation de 3 cm au moins peut être nécessaire si le flux de fuites est important, sinon ils se désaimantent l'un l'autre. Dans certains cas, une interruption même temporaire du circuit magnétique peu détériorer sérieusement la qualité.

Il est recommandé d'utiliser des outils, gabarits, plateaux ou boîtes en alliages amagnétiques pour le travail ou la manipulation des aimants.

f) UTILISATION DES AIMANTS.

Les principales applications sont les aimants pour génératrices, moteurs et magnétos, les aimants pour appareils de mesure à cadre mobile. Les performances supérieures obtenues avec les aciers à l'aluminium et la réduction des dimensions qui en a résulté ont conduit à leur utilisation universelle pour les aimants de haut-parleurs et de microphones, la concentration magnétique sur les tubes cathodiques, les aimants pour oscillateurs magnétrons de radars.

IV. LE CUIVRE ET SES ALLIAGES.

A) Origine.

Le minerai est un sulfure de cuivre qui est grillé dans un convertisseur. Le cuivre brut obtenu est affiné par électrolyse. Les principaux pays producteurs sont les Etats-Unis, l'U.R.S.S., le Chili, le Canada, le Congo Belge et la Rhodésie.

B) Propriétés.

Le cuivre a une masse volumique de 8,9 kg/dm^3. Il fond à 1 084 °C. Sa résistivité très faible en fait un excellent conducteur (ρ = 1,54 à 1,8 $\mu\Omega$ cm). Il est très malléable et résistant à la corrosion. A l'air il se recouvre d'une pellicule protectrice d'hydrocarbonates (vert de gris). Il est amagnétique.

On peut le souder avec flux (1) et le braser à l'étain. C'est un bon conducteur de la chaleur.

C) Utilisations.

Le cuivre est surtout utilisé pour les fils, câbles ou tubes conducteurs. Les fils conducteurs sont souvent étamés pour protéger le cuivre de l'oxydation et faciliter la soudure à l'étain. Comme autres applications des propriétés conductrices du cuivre citons : des cosses, des anodes de triodes d'émission, des cavités de magnétrons et klystrons, des tresses de dérivation de courant. Il constitue le revêtement extérieur du « copperclad » qui comporte une âme en ferro-nickel de même coefficient de dilatation que le verre et permet ainsi des passages conducteurs à travers le verre. Sa bonne conductibilité thermique est utilisée dans les supports de grilles des tubes électroniques pour éviter un échauffement exagéré.

En feuilles de 35 à 70 μ d'épaisseur, il sert au recouvrement des plaques isolantes utilisées pour la fabrication des circuits imprimés.

Citons encore son utilisation en association avec l'oxyde de cuivre dans les redresseurs secs dits « oxymétal ».

Par suite de son bon « accrochage » sur l'acier on réalise un cuivrage avant nickelage ou chromage.

En plus des alliages de cuivre étudiés ci-après, il sert d'élément d'addition dans certains aciers au nickel, dans le duralumin (4%), le métal Monel (30%).

D) Alliages de cuivre.

1° Les laitons. — Ce sont des alliages cuivre-zinc contenant de 10 à 40 % de zinc. Ils se moulent bien et présentent une aptitude particulière au décolletage ou au découpage avec addition de 1 ou 2 % de plomb.

Utilisations. — Visserie, boulonnerie, petites pièces décolletées. Armatures de condensateurs professionnels. Le « Tombac » contenant 28 % de zinc, étanche à l'air et possédant une excellente élasticité, est utilisé pour la fabrication de membranes souples ou soufflets. Citons encore des contacts en laiton argenté.

2° Les bronzes. — Ce sont des alliages cuivre étain contenant de 5 à 16 % d'étain. Ils peuvent être moulés facilement.

Le bronze phosphoreux U-E7P sert à fabriquer des fils pour ressorts hélicoïdaux ou des fils étamés à usages électriques (frettage d'induits).

Le bronze phosphoreux U-E9P sert à la fabrication de pièces découpées dans de la tôle. Pour les usages courants il est remplacé par le bronze chrysocale U-E5Z4 qui est d'un emploi plus économique puisque du zinc y remplace l'étain (fourchette de CV, pinces de contact). Le chrysocale possède une bonne conductibilité et une excellente élasticité.

Le bronze fritté permet l'obtention de coussinets autolubrifiants qui, imprégnés d'huile ou de teflon sont utilisés comme paliers dans les tourne-disques, les magnétophones.

(1) Flux : produits employés en soudure comme fondants et ayant des propriétés réductrices.

3° Les maillechorts. — Ce sont des alliages de cuivre contenant de 17 à 45 % de zinc et de 9 à 28 % de nickel. Le maillechort U-N26Z17 est recommandé pour la fabrication de pièces ou de ressorts de contact (interrupteurs, curseurs de potentiomètres...) car il est élastique et sa résistance à la rupture atteint 65 daN/mm^2. Leur résistivité assez importante (30 à 40 $\mu\Omega$ cm) ainsi que leur bonne résistance mécanique trouvent leur application dans la construction de rhéostats très robustes.

4° Les cupronickels. — Ils contiennent de 5 à 50 % de nickel et sont caractérisés par une résistivité assez grande et un faible coefficient de température ce qui justifie leur emploi pour les résistances de précision (voir chapitre 7).

Les plus connus sont le constantan U-N40 et le manganin U-M12N4 qui contient 12 % de manganèse.

Le constantan est utilisé aussi pour réaliser des électrodes non magnétiques à la place de nickel.

V. L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES.

A) Origine.

L'aluminium s'obtient à partir de la bauxite (hydrate naturel d'alumine). La France est parmi les principaux producteurs. C'est un produit de l'électrolyse de l'alumine (Al_2O_3) en présence de cryolithe fondue (fluorure double d'aluminium et de sodium AlF_2, 3 NaF).

B) Propriétés.

1° Physiques. — C'est un métal léger de masse volumique 2,7 kg/dm^3 et dont le point de fusion est peu élevé (658 °C). Il est bon conducteur de la chaleur. C'est aussi un très bon conducteur électrique qui a une faible résistivité ($\rho = 2{,}9$ $\mu\Omega$cm).

2° Mécaniques. — Sa charge de rupture est faible (12 daN/mm^2). Il est très malléable et ductile. Sa dureté est faible et il se raye facilement.

3° Chimiques. — L'aluminium se recouvre spontanément à l'air d'une couche d'alumine (Al_2O_3) protectrice qui empêche la corrosion ultérieure. Il est d'autant moins sensible à la corrosion qu'il est plus pur.

En milieu humide ou corrosif il ne faut associer l'aluminium qu'avec des métaux plus électronégatifs (zinc, cadmium) pour éviter la corrosion électrolytique.

La pellicule d'alumine qui se forme nécessite des précautions particulières pour le soudage de l'aluminium et de ses alliages. On ne peut le souder qu'en prenant des précautions particulières : soudage avec flux, soudage en atmosphère neutre (argon) ou utilisation de fer à souder à ultra-sons pour le soudage à l'étain,

MÉTAUX PURS

Cuivre	U9	U6	U4	**Aluminium**	A9	A7	A5	A4

ALLIAGES

Bronzes	U-E5	U-E10	U-E10Z1	U-E12	U-E14	U-E16	U-E7P	U-E5Z4	U-E9P
	Usages courants	Mécanique		Frottement + chocs	Efforts élevés	Usure + écrasem.	Ressorts fils étamés	(Chrysocale) Ressorts	Qualité supérieure
Cupro-Ni	Constantan U-N40		Manganin : U-M12N4		Cupron : U-N45		Alliage 190 : U-N22		
Laitons	U-Z10	U-Z15	U-Z33	U-Z36	U-Z40	U-Z39Pb1			
	décolletage	usages généraux	moulé sable	barres-tôles tubes	forgeable	décolletage			
Maillechorts	U-ZN13	U-Z22N18	U-Z27N18	U-N26Z17	U-Z26N9Pb1				
	moulage sable	usages divers	(Alpacca) ressorts	résistances lames de contact	Décolletage				
Ni alliés	N-U30Fe (Monel) contre la corrosion		N-C14Fe (Inconel) résiste à haute température		N-C20 (Nichrome) résistances bobinées				
Zamaks	Z-A4G	Z-A4U1G	Z-A4U3G	Moulage sous pression					
Antifrictions	E-R12U6Pb	Pb-R16 E10	Garniture de coussinets						
Al. alliés	A-G5	A-U5GT	A-S13	A-G3	A-U4G	A-GS	A-U4Pb		
	Alumag	A.P.M.	Alpax	Duralinox	Duralumin	Almélec	Fortal		
	moulage coquilles	moulage sous pression	moulage sable ou coquilles	contre la corrosion	hautes caractéristiques	conducteurs électriques	décolletage		

TABLEAU 3.5. — MÉTAUX NON FERREUX

C) Utilisations.

La légèreté de l'aluminium le fait utiliser comme conducteur à la place du cuivre là où le poids a une importance (conducteurs suspendus, aviation). L'aluminium pur s'utilise en plaquage sur le Duralumin (Védal) ou sur le fer (Fer-al-ma) pour les protéger de la corrosion. Le Fer-al-ma peut être utilisé pour réaliser des pièces magnétiques internes de tubes électroniques.

Une utilisation importante est la fabrication d'armatures pour les condensateurs.

Il sert d'élément d'addition dans un certain nombre d'alliages : aciers à l'aluminium pour aimants, zamaks, cupro-aluminium, alliages de magnésium.

En couche mince conductrice déposée par évaporation sous vide, il est utilisé dans des tubes photoélectriques.

D) Alliages d'aluminium.

Ils sont très nombreux et nous ne citerons que ceux que l'on rencontre le plus souvent dans le matériel électrique ou électronique.

1° Alliages de fonderie.

A-U5GT ou alliage A.P.M. utilisé pour le moulage sous pression de petites pièces en grandes séries.

A-S13 ou Alpax utilisé pour le moulage en sable de carters, supports, boîtiers.

2° Alliages de forge.

A-G3 ou Duralinox utilisé pour sa résistance à la corrosion.

A-U4G ou Duralumin dont la charge de rupture atteint 40 daN/mm^2 utilisé pour des pièces résistantes.

A-GS ou Almélec utilisé comme conducteur électrique.

A-U4Pb ou Fortal utilisé pour la fabrication en série de boulonnerie, visserie et petites pièces par décolletage.

VI. LES MÉTAUX AUTRES QUE Fe, Al, Cu.

Les propriétés chimiques et un certain nombre de propriétés physiques étant liées à la constitution de la couche électronique externe des atomes, l'étude des métaux doit être faite dans le cadre de la classification périodique. Elle permet de grouper les métaux qui ont des propriétés et des applications analogues. (Voir chapitre I, § V).

A) Premier groupe.

1° Groupe principal : les métaux alcalins. Lithium (Li), sodium (Na), potassium (K), rubidium (Rb), césium (Cs).

Ces métaux permettent de réaliser les couches photosensibles des cellules photoélectriques. Leur sensibilité se déplace vers le rouge lorsque la masse atomique augmente. Les photocathodes au césium sont les plus employées.

Ils servent à la production d'ions positifs lourds. Le sodium est utilisé dans les lampes à vapeur de sodium de couleur jaune.

Ils entrent dans la composition des verres en particulier le sodium et le potassium sous forme de soude et potasse (Na_2O et K_2O).

2° Groupe secondaire : cuivre (Cu), argent (Ag), or (Au).

— *Cuivre* : voir paragraphe IV.

— *Argent* : c'est le meilleur des conducteurs, sa résistivité est inférieure à celle du cuivre ($\rho = 1{,}45\ \mu\Omega$ cm). Son prix de revient en limite les applications. Il possède une grande résistance à l'oxydation.

Utilisations. — Armatures de condensateurs, fusibles calibrés, dépôts, conducteurs minces (contacts, curseurs, colliers de fixation de pistes de potentiomètres).

Il sert de support de couches photosensibles dans les cellules photoélectriques.

— *Or* : utilisé en dépôt électrolytique sur les grilles de tubes électroniques susceptibles de chauffer pour lutter contre l'émission de grilles. Il possède aussi une très bonne conductibilité.

B) Deuxième groupe.

1° Groupe principal : les métaux alcalino-terreux : béryllium (Be), magnésium (Mg), calcium (Ca), strontium (Sr), baryum (Ba).

Les oxydes alcalino-terreux (BaO, SrO, CaO) possédant une forte émission électronique à température relativement basse sont utilisés comme revêtements de cathodes à oxydes. Le magnésium entre comme élément d'addition dans le nickel composant le support de ces revêtements.

Le baryum, le magnésium et le calcium sont utilisés comme getters pour parfaire le vide des tubes électroniques (voir chapitre 12).

Le calcium et le magnésium entrent sous forme de chaux (CaO) et de magnésie (MgO) dans la composition des verres et des céramiques.

Les titanates de métaux alcalino-terreux donnent des diélectriques pour condensateurs ayant une grande permittivité.

L'oxyde de béryllium (Barycer; BeO) fond à 2 530 °C. Il est utilisé après frittage comme creuset pour la fusion de tous les métaux communs.

2° Groupe secondaire : zinc (Zn), cadmium (Cd), mercure (Hg).

— *Zinc* : Son point de fusion peu élevé (419 °C) et sa bonne coulabilité le font utiliser sous forme d'alliages (zamaks Z-A4G, Z-A4U1G) pour le moulage sous pression de petites pièces en grande série (boîtiers de potentiomètres, de microphones, de combinateurs, poignées, poulies, cages de roulements).

Son inaltérabilité à l'air le fait utiliser comme revêtement protecteur : galvanisation.

Le zinc forme la cathode de la plupart des piles.

GROUPES / PÉRIODES	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	$_{1}H$							$_{2}He$		
2	$_{3}Li$	$_{4}Be$	$_{5}B$	$_{6}C$	$_{7}N$	$_{8}O$	$_{9}F$	$_{10}Ne$		
3	$_{11}Na$	$_{12}Mg$	$_{13}Al$	$_{14}Si$	$_{15}P$	$_{16}S$	$_{17}Cl$	$_{18}A$		
4	$_{19}K$	$_{20}Ca$	$_{21}Sc$	$_{22}Ti$	$_{23}V$	$_{24}Cr$	$_{25}Mn$	$_{26}Fe$	$_{27}Co$	$_{28}Ni$
	$_{29}Cu$	$_{30}Zn$	$_{31}Ga$	$_{32}Ge$	$_{33}As$	$_{34}Se$	$_{35}Br$	$_{36}Kr$		
5	$_{37}Rb$	$_{38}Sr$	$_{39}Y$	$_{40}Zr$	$_{41}Nb$	$_{42}Mo$	$_{43}Tc$	$_{44}Ru$	$_{45}Rh$	$_{46}Pd$
	$_{47}Ag$	$_{48}Cd$	$_{49}In$	$_{50}Sn$	$_{51}Sb$	$_{52}Te$	$_{53}I$	$_{54}Xe$		
6	$_{55}Cs$	$_{56}Ba$	Terres rares 57 à 71	$_{72}Hf$	$_{73}Ta$	$_{74}W$	$_{75}Re$	$_{76}Os$	$_{77}Ir$	$_{78}Pt$
	$_{79}Au$	$_{80}Hg$	$_{81}Tl$	$_{82}Pb$	$_{83}Bi$	$_{84}Po$	$_{85}A$	$_{86}Rn$		
7	$_{87}Fr$	$_{88}Ra$	$_{89}Ac$	$_{90}Th$	$_{91}Pa$	$_{92}U$	Transuraniens 93 à 103 (1959)			

TABLEAU 3.6. — CLASSIFICATION DE MENDÉLÉEV

— *Cadmium* : résiste bien à la corrosion et on l'utilise comme revêtement protecteur déposé par électrolyse. Cadmiage de l'acier : châssis de récepteurs, bâti de C.V., axes de commande, visserie...

Le sulfure de cadmium est utilisé dans les cellules photoconductrices.

Les sulfures de zinc et cadmium servent comme substances luminescentes dans les tubes cathodiques avec activation à l'argent.

Le cadmium permet la réalisation de plaques dans les accumulateurs au cadmium-nickel plus légers que les accumulateurs au plomb.

— *Mercure* : c'est le seul métal liquide à la température ordinaire. Sa forte masse volumique (13,6) le fait utiliser en manométrie. Les pompes à diffusion qui servent à faire le vide pendant la fabrication des tubes électroniques utilisent du mercure.

La conductibilité du mercure est utilisée dans les interrupteurs sous vide à basculement et dans les piles au mercure.

Les tubes à gaz fonctionnant avec émission par champ électrique possèdent des cathodes de mercure.

La vapeur de mercure présente de nombreux avantages comme gaz de remplissage des diodes et triodes à gaz (voir sixième chapitre).

C) Troisième groupe.

1° Groupe principal : bore (B), aluminium (Al) et métaux des terres rares.

— *Bore* : le nitrure de bore (Borazon) utilisé comme abrasif est le plus dur de tous les corps connus. Il raye le diamant. L'anhydride borique entre dans la composition de certains verres.

— *Aluminium* (voir paragraphe V).

2° Groupe secondaire : gallium (Ga), indium (In), thallium (Tl).

Leur addition (ainsi que B, Al) avec les éléments semi-conducteurs du 4e groupe permet de réaliser des éléments de « type p » du fait de leur couche électronique externe qui ne comporte que trois électrons (voir chapitre 5). Le plus important est l'indium.

Le sulfure de thallium est utilisé dans les cellules photoconductrices (photomètres, luxmètres).

D) Quatrième groupe.

1° Groupe principal : titane (Ti), zirconium (Zr), hafnium (ha), thorium (Th).

— *Thorium* : Son pouvoir émissif élevé trouve son emploi sur les cathodes en tungstène thorié utilisées dans les tubes d'émission.

— *Titane* : Il a acquis une importance toute particulière en électronique par ses composés, les titanates utilisés dans les condensateurs céramiques (voir chapitre 10). Puis, il sert également comme métal de scellement à certaines céramiques (Forstérite).

— *Zirconium* : On l'utilise dans certains tubes comme getter non volatilisé.

Il a un faible coefficient d'émission secondaire et on l'emploie en badigeon sur des grilles ou des anodes de tubes d'émission.

2° Groupe secondaire : carbone (C), silicium (Si), germanium (Ge), étain (Sn), plomb (Pb).

— *Silicium* et *germanium* sont étudiés au chapitre sur les semi-conducteurs.

— *Carbone* : Suivant le type de cristallisation le carbone peut être soit isolant (diamant) soit conducteur (graphite) avec une résistivité de l'ordre de 1 000 $\mu\,\Omega$ cm. Cette forte résistivité a trouvé une application importante dans la fabrication des résistances agglomérées et à couche (voir septième chapitre), des microphones à charbon.

Il ne fond pas et se sublime à 3 500 °C d'où son emploi comme électrodes, creusets, et balais de moteurs électriques (il résiste bien à l'arc électrique).

Le graphite a un facteur d'émission totale élevé, une tension de vapeur très faible et une grande facilité de dégazage, qualités qui le font utiliser comme anodes de tubes électroniques de petite puissance et de thyratrons. Mis en suspension dans l'eau on s'en sert comme peinture conductrice sur les parois internes de certains tubes (tubes cathodiques).

Sa tétravalence (ainsi que celle du silicium) lui permet des combinaisons multiples avec les autres corps, propriété qui est à la base de la chimie des matières plastiques (voir 4e chapitre).

— *Etain* : c'est un métal mou qui fond à 232 °C et est inaltérable à l'air. Ses propriétés principales le font utiliser comme revêtement protecteur (étamage) et comme soudure tendre en mélange avec le plomb.

— *Plomb* : c'est aussi un métal mou ayant un bas point de fusion (328 °C) et inaltérable à l'air et résistant aux acides. Cette dernière propriété trouve son emploi dans les batteries d'accumulateurs.

Le plomb est utilisé comme gaines de câbles électriques et comme joints d'étanchéité.

Comme élément d'addition dans les alliages de cuivre ou d'aluminium, il facilite le décolletage.

E) Cinquième groupe.

1° Groupe principal : vanadium (V), niobium (Nb), tantale (Ta).

Le tantale est le plus important en électronique. Il sert à faire certaines cathodes spéciales ou des grilles de tubes utilisés en VHF. Le niobium et le tantale en addition améliorent la qualité des aimants.

L'oxyde de tantale est utilisé comme diélectrique de condensateurs électrochimiques.

2° Groupe secondaire : arsenic (As), antimoine (Sb), bismuth (Bi).

Leur addition avec des éléments semi-conducteurs du 4e groupe permet de réaliser des éléments de « type *n* » du fait de leur couche électronique externe qui comporte cinq électrons (voir chapitre 5).

L'antimoine en combinaison avec le césium sert à réaliser des couches photosensibles pour cellules photoélectriques.

F) Sixième groupe.

1° Groupe principal : chrome (Cr), molybdène (Mo), tungstène (W), uranium (U).

— *Chrome* : c'est un métal blanc, brillant à point de fusion élevé (1 515 °C). Il est le plus dur des métaux. Il est cher et n'est utilisé que sous forme de revêtements ou d'éléments d'addition dans les alliages.

Sa résistance à la corrosion est utilisée dans le « chromage décoratif » et dans les aciers inoxydables au nickel chrome. Le « chromage dur » plus épais est utilisé pour la recharge de pièces usées (outils, matrices, axes). Sa résistivité importante (13 $\mu\Omega$ cm) trouve son utilisation dans la fabrication des résistances au nickel chrome (voir nickel).

— *Molybdène* : il a un point de fusion élevé (2 600 °C). Il est résistant aux températures élevées d'où son utilité comme élément d'addition dans les aciers réfractaires. Cette propriété ainsi que sa faible volatilité l'ont fait choisir pour la fabrication des grilles de tubes électroniques.

Comme élément d'addition il améliore la perméabilité des ferronickels. Seule la métallurgie des poudres est utilisée pour son élaboration.

— *Tungstène* : c'est le métal le plus réfractaire. Il fond à 3 380 °C. Sa résistance mécanique sous forme de fil est très grande. Pour un fil de 0,5 mm de diamètre on a à 20 °C une résistance à la traction de 200 daN/mm². A 800 °C sa résistance est encore de 100 daN/mm². Sa masse volumique (ρ = 18 kg/dm³) est élevée.

Par ailleurs il possède une bonne conductibilité thermique et électrique, une faible tension de vapeur dans le vide. Ces qualités en font le matériau idéal pour la fabrication des filaments chauffant des tubes électroniques et des cathodes pour tubes d'émission à grande puissance, les anticathodes de tubes à rayons X. Il donne des carbures très durs utilisés en association avec le carbure de cobalt, pour la fabrication des outils de coupe.

Ses qualités réfractaires sont mises à profit dans les utilisations de l'arc électrique (lampes à arc, électrodes non consommables pour soudure à l'arc).

Il est soudable aux verres du type « Pyrex » et servira à réaliser des « traversées ».

Les aimants ordinaires sont en acier au tungstène. La formation de carbures pendant le traitement thermique entraîne de puissants efforts intra-moléculaires qui leur confère leur dureté magnétique.

Les produits frittés tungstène-cuivre servent à réaliser des contacts haute tension et basse tension dans les appareils de coupure électriques.

Les tungstates de métaux alcalino-terreux sont utilisés comme revêtements fluorescents des tubes cathodiques sensibles dans l'ultra violet.

Le tungstène ne peut être élaboré que par la métallurgie des poudres.

2° Groupe secondaire : sélénium (Se), tellure (Te), polonium (Po).

Ils seront examinés dans le chapitre sur les semi-conducteurs (chapitre 5).

G) Septième groupe.

Le seul élément métallique important de ce groupe est le manganèse (Mn).

Allié au cuivre, il sert à réaliser le manganin (U-M12N4) qui a un très faible coefficient de température et est utilisé à la fabrication de résistances bobinées de précision.

Il entre dans la composition de certains aciers pour décolletage.

Le bioxyde de manganèse (MnO_2) est utilisé comme dépolarisant dans les piles Leclanché.

H) Huitième groupe.

1° Groupe du fer : fer (Fe), cobalt (Co), nickel (Ni).

— *Fer* (voir paragraphe III).

— *Cobalt* : son utilisation principale a été vue pour les aimants en acier au cobalt qui en contiennent 3 à 35 %. Point de Curie : 1 120 °C.

— *Nickel* : Il est magnétique comme les deux précédents. Il est très malléable et inoxydable à la température ordinaire d'où son emploi comme revêtement protecteur électrolytique (nickelage).

Il prend une importance exceptionnelle dans la fabrication d'anodes ou d'ailettes de refroidissement dans les tubes électroniques en raison de la quantité faible de gaz qu'il contient, de son point de fusion élevé (1 450 °C) et de son inoxydabilité (voir chapitre 12).

Les nickels pour cathodes contiennent des éléments réducteurs afin d'obtenir une bonne émission électronique et une résistance mécanique à chaud plus élevée. On leur ajoute 0,1 % de magnésium pour les cathodes à chauffage indirect ou un peu de cobalt pour celles à chauffage direct (nickel-ballast, Cobanic, Hilanic, voir chapitre 12).

Les propriétés magnétiques du nickel sont mises à profit dans les ferro-nickels et les aciers à aimants (voir paragraphe III).

Les alliages de nickel-chrome qui ont une forte résistivité de l'ordre de 100 $\mu\Omega$ cm sont utilisés pour confectionner des résistances bobinées de puissance (voir chapitre 7).

En élément d'addition, il donne toute une gamme d'aciers alliés pour traitements thermiques ou d'aciers inoxydables.

2° Groupe du platine : platine (Pt), iridium (Ir), rhodium (Rh), palladium (Pd).

Le platine est un métal noble seulement attaquable par l'eau-régale. Seul ou en association avec l'iridium il sert à réaliser des pièces à très faible dilatation, des films métalliques pour résistances professionnelles, ainsi que l'alliage argent-palladium.

Le platine rhodié est utilisé pour certains contacts.

Le platine sert à la confection des creusets inertes chimiquement pour laboratoires. Il est remplacé par le polytétrafluoréthylène moins coûteux si la température est inférieure à 300 °C.

VII. NORMES.

NF A 02-001. Désignation conventionnelle des métaux et alliages (1944).
FD A 30-009. Généralités sur la normalisation des aciers (1954).
NF A 30-010. Aciers non alliés soudables (1945).
NF A 32-811. Pièces poulées en fonte malléable (1948).
NF A 32-051. Pièces moulées en acier non allié (1950).
NF A 32-101. Pièces moulées en fonte grise (1952).
NF A 53-011. Cuivres normalisés (1948).
NF A 53-012. Bronzes normalisés (1948).
NF A 53-013. Laitons normalisés (1948).
NF A 53-014. Maillechorts normalisés (1947).
NF A 53-015. Cupro-aluminiums et cupro-plombs (1945).
NF A 53-703. Pièces moulées en laison (1945).
NF A 55-010. Pièces moulées sous pression en alliages de zinc (1951).
NF A 57-312. Barres et profilés en alliages d'aluminium (1948).
NF A 57-702. Pièces coulées en alliages d'aluminium (1953).
NF C 28-900. Tôles pour circuits magnétiques : Spécifications (1956).
NF C 28-910. Tôles en rouleaux pour circuits magnétiques (1960).
NF C 28-920. Tôles à cristaux orientés pour circuits magnétiques (1960).
Groupe de normes NF C 30, 31, 32, 33 et 34 : conducteurs nus et isolés.

CHAPITRE 4

LES ISOLANTS

I. GÉNÉRALITÉS.

A) Définitions (Vocabulaire électronique NF C 01-005).

1° Isolant. — Substance ou corps dont la conductivité est nulle ou, en pratique très faible.

2° Pouvoir isolant. — Terme général employé pour désigner l'aptitude d'une matière à servir d'isolant.

3° Isolation. — Ensemble des isolants entrant dans la construction d'une machine ou d'un appareil pour isoler ses conducteurs.
Désigne aussi l'action d'isoler.

4° Isolement. — Ensemble des qualités acquises par un système conducteur du fait de son isolation.

B) Propriétés.

L'emploi des isolants nécessite la prise en considération non seulement des qualités électriques mais aussi d'autres qualités qui sont résumées ci-après.

1° Propriétés électriques (voir chapitre 2).

Rigidité — Permittivité — Résistivité normale et résistivité superficielle — Coefficient de température — Facteur de pertes.

2° Propriétés mécaniques. — Résistance à la traction, à la flexion — Aptitude au poinçonnage — Dureté — Elasticité — Résistance au choc, à l'usure, etc...

3° Propriétés physiques. — Masse volumique — Homogénéité — Résistance à la chaleur — Coefficient de dilatation — Absorption d'eau — Transparence.

4° Propriétés chimiques. — Résistance aux acides, aux solvants à l'huile, à l'eau — Toxicité — Vieillissement.

5° Propriétés commerciales. — Prix de revient — Facilité d'approvisionnement.

C) Classification.

Les isolants peuvent être classés de plusieurs façons suivant que l'on prend en considération leurs origines, leurs analogies chimiques, leur état physique, leur mode d'obtention, leurs propriétés électriques, etc...

Nous adopterons une classification basée sur l'origine des isolants avec la mise en valeur des propriétés électriques en HF pour les isolants synthétiques dont la liste s'agrandit constamment.

Le tableau 4.1 -ci-dessous donne la classification des isolants d'après les températures maximales de service.

TABLEAU 4.1. — CLASSES D'ISOLANTS NORMALISÉES

Classes	Température maximale (°C)	Nature des isolants
Y	90	Coton, soie, fibre, papier, carton, bois, formophénoliques, polyacrylate, polyéthylène, polystyrène, chlorure de polyvinyle, caoutchouc naturel.
A	105	Papier, carton, soie, coton immergés dans un diélectrique liquide. Tôle et papier vernis, stratifiés, phénoplastes, bois. Films cellulosiques. Polyesters à chaînes transversales. Emaux oléo-résineux et résines polyamides.
E	120	Emaux aux résines formal-polyvinyle, polyuréthane, époxydes. Stratifiés, papiers, cartons. Phénoliques. Polyesters à chaînes transversales. Films triacétate de cellulose, téréphtalate de polyéthylène.
B	130	Fibre de verre, amiante ou mica imprégnés ou vernis avec résines polyesters ou polyuréthanes. Résines phénoliques moulées avec charge minérale.
F	155	Fibre de verre, amiante ou mica imprégnés, vernis ou agglomérés avec des résines alkydes ou epoxydes.
H	180	Fibre de verre, amiante ou mica imprégnés, vernis ou agglomérés aux résines silicones.
C	> 180	Mica. Porcelaine. Céramiques. Verre. Quartz. Alumine. Polytétrafluoréthylène.

II. ISOLANTS MINÉRAUX.

A) Isolants minéraux naturels.

1° Amiante.

Nature. — C'est un silicate de calcium et de magnésium.

Propriétés. — L'amiante résiste jusqu'à 1 500 °C au feu et peut être filée et tissée.

Elle est imputrescible et résiste aux acides. Sa résistivité est assez faible et les pertes augmentent avec la fréquence.

Applications. — Sous forme de tissus, de tresses ou de plaques on l'utilise pour des joints ou des panneaux résistants à la chaleur. Mélangée au ciment elle donne le fibro-ciment.

2° Ardoise.

Nature. — C'est un silicate d'aluminium impur.

Propriétés. — L'ardoise se clive facilement. Sa résistivité est de l'ordre de 250 MΩ cm.

Utilisations. — Elle permet la fabrication de tableaux de distribution.

3° Mica.

Nature. — C'est un silicate hydraté d'alumine et de potassium en provenance de Madagascar ou des Indes.

Propriétés. — Il se clive en feuilles très minces jusqu'à 1 μ d'épaisseur. Sa résistivité satisfaisante varie de 10^3 à 10^5 TΩ cm suivant les variétés. Il a des pertes diélectriques très réduites en HF.

Sa température d'utilisation ne doit pas dépasser 600 °C. Il possède une forte rigidité diélectrique de l'ordre de 70 kV/mm pour des lames de 0,1 à 1 mm d'épaisseur.

Sa permittivité est importante et varie de 5 à 9 suivant les variétés. Il possède une certaine plasticité.

Utilisations. — Isolement entre lames de collecteurs de machines électriques. Protection de résistances. Diélectrique de condensateurs pour HF. Supports d'électrodes dans les tubes électroniques. (Seul le mica indien qualité rubis clair, dénommé encore mica moscovite, convient pour cette application car il ne donne pas de dégagement gazeux). Des pièces isolantes de formes diverses peuvent être obtenues en agglomérant le mica avec de la gomme laque (Micanite) ou du borate de plomb (Micalex).

4° Quartz.

Nature. — Le quartz naturel est une roche cristalline (cristal de roche) composé de silice SiO_2. La silice fond aux environs de 2 000 °C pour donner du « quartz fondu », (quartz synthétique industriel : USA 1961).

Propriétés. — C'est un excellent isolant dont la résistivité est supérieure à 10^6 TΩ cm. Ses pertes en HF sont très faibles et il peut être utilisé jusqu'à 1 000 °C.

Il a une grande résistance aux attaques chimiques, aux chocs thermiques et à la chaleur.

Il possède des propriétés piézoélectriques.

Utilisations. — Entretoises et manchons isolants dans la construction de tubes électroniques ou de condensateurs variables pour émission.

Ampoules transparentes aux rayons ultra-violets (cellules photo-électriques, lampes à vapeur de mercure).

Oscillateurs pour émission. Générateurs d'ultra-sons.

B) Isolants minéraux artificiels.

1° Verres.

Nature. — Ce sont des solides amorphes constitués de solutions solides de silicates alcalins et alcalino-terreux. Ils contiennent de 60 à 80 % de silice (SiO_2) de 4 à 17 % de soude (Na_2O) de la potasse (K_2O), un peu d'alumine [1] (Al_2O_3) et suivant les types de verres, de la chaux (CaO) de l'oxyde de plomb (PbO) ou de l'anhydride borique (B_2O_3).

On les classe en :

a) Verres tendres dont la température de ramollissement est comprise entre 640 et 720 °C et dont le coefficient de dilatation est important.

— verre à la chaux (verre blanc),

— verre au plomb (ou cristal).

b) Verre durs dont la température de ramolissement est comprise entre 720 et 820 °C et dont le coefficient de dilatation est faible.

— verres borosilicatés (Pyrex, MO2A, B40).

Propriétés. — La résistivité est très variable suivant la composition des verres. De l'ordre de quelques TΩ cm pour le verre ordinaire, elle prend des valeurs importantes atteignant 100 000 TΩ cm pour le verre au plomb.

La rigidité varie de 60 à 300 kV/cm. La permittivité oscille entre 3 et 11. Les pertes en H.F. sont faibles pour les verres durs. Ils se travaillent par soufflage ou moulage et peuvent être soudés à différents métaux et alliages (voir chapitre 3).

Les verres durs résistent mieux que les verres tendres aux chocs thermiques [2] et mécaniques.

Utilisations. — Ampoules pour tubes électroniques.

Diélectrique de condensateurs.

Protection de résistances, de thermistances et condensateurs.

Sorties de fils par perles de verre dans les résistances professionnelles ou dans les tubes « tout métal ».

(1) Le corindon, utilisé comme abrasif, est de l'alumine naturelle cristallisée.

(2) Choc thermique : variation brutale de température.

La fibre de verre est utilisée dans les panneaux pour insonorisation. Elle se tisse et imprégnée de résines synthétiques (polyester, silicone) elle donne des plaques souples et de résistance mécanique élevée. (Résistance à la traction des statifiés verre-polyester de 15 à 30 daN/mm^2.)

2° Porcelaines.

Nature. — Elles sont obtenues par cuisson d'un mélange en proportions variables de kaolin, feldspath et quartz.

Pour supprimer leur porosité elles sont vitrifiées superficiellement par cuisson vers 1 500 °C.

Propriétés. — La porcelaine est dure et résistante à la compression. Sa résistivité est de l'ordre de 100 TΩ cm.

Utilisations. — Protection de résistances.

Isolateurs divers. Pour les isolateurs à forte charge on emploie l'Alumine pure dont la résistance mécanique est double de celle de la porcelaine (charge de rupture à la compression : 105 daN/mm^2).

3° Céramiques.

Nature. — Elles sont constituées d'un mélange de silicates et d'oxydes métalliques (magnésie MgO, alumine Al_2O_3, rutile TiO_2) et autres oxydes alcalins et alcalino-terreux).

Leur composition est très variable et elles sont utilisées sous des noms tels que : Ultra-Calan, Calit, Fréquenta, Forstérite, Tangentite, Stéatite, etc.,.

Une des plus utilisées, la Stéatite est composée de 60 % de talc (3 MgO, 4 SiO_2, H_2O), 30 % de kaolin (Al_2O_3, 2 SiO_2, 2 H_2O) et 10 % d'oxydes alcalins. Les céramiques frittées à base d'alumine pure (Alucer) peuvent être utilisées à des températures dépassant 1 200 °C. Leur charge de rupture à la compression est comprise entre 60 et 240 daN/mm^2.

Propriétés. — Les céramiques sont mises en forme à partir de poudre et cuites au four au dessus de 1 000 °C en provoquant soit une simple concrétion (céramiques poreuses) soit une vitrification (céramiques étanches). Leur résistivité est comprise entre 1 et 10^3 TΩ cm. Leurs pertes en HF sont faibles et croissent très peu à chaud. Leur permittivité peut atteindre des valeurs très importantes avec les titanates (voir propriétés des céramiques à base de titane au chapitre 10).

Utilisations. — Supports de résistances.
Entretoises dans tubes électroniques.
Supports de tubes.
Diélectriques de condensateurs.
Pièces isolantes en H.F.

4° Emaux.

Nature. — Ce sont des verres très fortement chargés en oxyde de plomb.

Propriétés. — Leur point de ramollissement est nettement inférieur à celui des verres (400 à 500 °C).

Utilisations. — Soudures verre-verre, verre-mica. Revêtements protecteurs. (On appelle par extension émail, le revêtement des fils conducteurs constitué par des vernis synthétiques).

5° Huiles minérales.

Leur résistivité satisfaisante et la rigidité atteignant 100 kV/cm permettent leur emploi comme huile de transformateurs industriels dans lesquels elles assurent l'isolement et le refroidissement. On les utilise pour l'imprégnation de condensateurs BF au papier.

6° Ozokérite.

C'est une cire minérale qui purifiée donne la « cérésine ».

Ses qualités diélectriques sont supérieures à celles de la paraffine. De plus elle ne fond qu'aux environs de 70 °C alors que la paraffine fond à 40 °C. Les utilisations sont les mêmes que celles de la paraffine avec possibilité de l'employer en HF étant données ses qualités.

III. ISOLANTS ORGANIQUES.

A) Bois et dérivés.

Nature. — Les essences indigènes les plus utilisées sont le chêne, le hêtre, le noyer et les résineux. Citons parmi les bois équatoriaux l'acajou, le palissandre et l'okoumé particulièrement apte à la fabrication du contreplaqué.

Propriétés. — Elles sont très variables d'une essence à l'autre et de plus le bois est anisotrope ce qui limite beaucoup ses applications. Ses qualités électriques sont médiocres et il est très hygroscopique. Sa sensibilité à l'humidité est diminuée par des revêtements divers : cires, vernis, laque, paraffine.

Ses propriétés peuvent être améliorées par des traitements tels que la compression ou l'imprégnation.

Le bois contient 60 % de cellulose qui est utilisée pour la fabrication des papiers et cartons ainsi que certaines matières plastiques pratiquement inutilisées en électronique (Celluloïd, Cellophane, Rhodoïd) et des peintures ou vernis (nitrocellulosiques, acétocellulosiques).

Utilisations

1° Bois. — Ebénisteries de luxe. Supports. Contreplaqué pour cloisons. Baffle de haut-parleur.

2° Bois imprégné. — Soit imprégné sous forte pression de résines thermodurcissables telle que la bakélite soit reconstitué à partir de sciure ou copeaux agglomérés par des résines synthétiques. Utilisé sous forme de plaques dans le premier cas, on peut mouler des pièces isolantes de formes diverses dans le deuxième cas.

3° Papiers, cartons. — Ils sont constitués de fibres de cellulose plus ou moins pure. Leurs caractéristiques électriques sont médiocres et on les améliore par imprégnation de cires, d'huile ou de résines.

Les principales applications en électronique sont le papier pour condensateurs constitué de cellulose pure (voir chapitre 10), le papier pour isolement entre couches de fils dans les transformateurs, le papier pour cônes de haut-parleurs, le carton pour protection de condensateurs.

Le carton « presspahn » imprégné et comprimé sous forte pression est utilisé pour des carcasses de bobinages.

Le carton bakélisé est utilisé en AF comme supports de bobinages, supports de tubes électroniques, plaquettes et rondelles isolantes.

TABLEAU 4.2. — NORMALISATION DES CARTONS ISOLANTS

Catégories	Masse volumique (kg/dm^3)	Absorption d'huile max.	Charge de rupture à la traction (daN/mm^2)	Rigidité diélec. (kV/mm^2)	Propriétés
A	1,2 à 1,45	—	4 à 5	8 à 10	Carton dur, faible porosité, lustré.
B	0,9 à 1,2	25 %	3	6 à 8	Carton tendre, grande aptitude au formage.
C	0,9 à 1,1	20 %	6	5 à 6	Carton tendre, bonne aptitude au formage, épaisseur max. : 4 mm.
D	1,1 à 1,2	10 %	7	9 à 12	Carton souple, grande résistance à la traction.
E	1,25 à 1,4	—	10 à 12	12 à 14	Carton dur rigide, très bonne résistance mécanique.

4° Fibre. — Elle est obtenue par vulcanisation de la cellulose avec le chlorure de zinc.

Sous forme de plaques, de tubes de couleur rouge ou grise, elle sert à réaliser des rondelles ou des joints isolants.

B) Latex et dérivés.

Nature. — C'est une gomme élastique tirée d'un arbre exotique : l'hévéa. Pour améliorer ses qualités on lui ajoute à chaud 2 à 10 % de soufre (vulcanisation) pour obtenir le caoutchouc.

Propriétés. — Le caoutchouc est une matière très élastique et résistante à l'usure. Ses qualités isolantes sont moyennes et surtout ne se conservent pas avec le temps, Il s'altère au contact de l'oxygène de l'air et son vieillissement est plus rapide au soleil. Les huiles et hydrocarbures le décomposent.

Utilisations.

1° Caoutchouc. — Il est utilisé en construction électrique pour la protection de fils et câbles. Citons encore des tampons et amortisseurs de vibrations, des passe-fils.

2° Ébonite. — Obtenue en modifiant le caoutchouc par une vulcanisation poussée (15 à 25 % de soufre).

L'ébonite qui permet la réalisation de pièces moulées utilisées en construction électrique, a été remplacée complètement en électronique par les matières synthétiques à cause de ses pertes diélectriques élevées.

3° Gutta-percha. — C'est une gomme naturelle tirée d'arbres d'Extrême-Orient, utilisée comme adjuvant pour les caoutchoucs naturels ou synthétiques. Elle est employée pour l'isolement de câbles, en particulier les câbles sous-marins.

C) Les résines.

Ce sont des secrétions d'arbres résineux dont les plus importantes sont les copals utilisés en peinture sous forme de vernis gras ou vernis à l'alcool, et la gomme laque employée pour immobiliser et protéger des bobinages électriques.

D) Les textiles.

Le coton est utilisé pour le guipage de fils conducteurs qui ne doivent pas supporter de tension élevée.

La soie pour des utilisations identiques donne un encombrement plus faible. Le Jaconas est un ruban tissé en fils de cellulose utilisé pour l'isolement de bobinages.

IV. ISOLANTS SYNTHÉTIQUES.

A) Généralités.

Les isolants synthétiques sont des matières plastiques obtenues par synthèse chimique à partir d'éléments intermédiaires tels que la cellulose, le benzène, l'acétylène, le formol, etc... tirés de produits naturels dont les principaux sont la houille, le pétrole et le bois.

On obtient des molécules géantes ou « macromolécules » dont la masse molaire peut dépasser 100 000.

La plus ancienne matière plastique est le celluloïd industrialisé en 1869. Il a été suivi en 1900 par la Galalithe obtenue à partir de la caséine du lait et par la mise au point pendant la guerre de 1914-18 de l'acétate de cellulose et de la Bakélite. Depuis la dernière guerre un nombre considérable de matières plastiques ont été créées parmi lesquelles une centaine industrialisées.

Les molécules de tous ces produits sont construites à partir d'atomes d'hydrogène et de carbone. On les dénomme composés « hydrocarbonés ».

Les atomes de carbone sont les piliers de l'organisation moléculaire. Leurs quatre électrons périphériques permettent quatre liaisons covalentes avec les atomes ou groupes d'atomes voisins. Cela permet des combinaisons multiples et la réalisation de chaînes linéaires contenant plusieurs centaines d'atomes, de réseaux bidimensionnels s'il existe des liaisons latérales entre chaînes ou tridimensionnels si l'édification se fait dans les trois dimensions de l'espace.

B) Elaboration.

Les deux modes d'élaboration principaux utilisés pour la fabrication des matières plastiques synthétiques sont la polymérisation et la polycondensation.

1° Polymérisation. — La macromolécule du polymère résulte de la soudure d'un grand nombre de molécules identiques du monomère sans perte de matière.

Exemple. — Cas du polyéthylène :

monomère $CH_2 = CH_2$.

polymère... — CH_2 — CH_2 — CH_2 — CH_2 —...

En réalité le schéma ci-dessus est simplifié et la chaîne comporte des ramifications.

Lorsque les molécules sont obtenues à partir de 2 monomères de type différent, on obtient des macro-molécules mixtes.

L'opération s'appelle « copolymérisation ». En général les propriétés sont intermédiaires entre celles des polymères correspondant.

Exemple de copolymère : L'acétochlorure de polyvinyle (matière première des disques micro-sillons).

2° Polycondensation. — La macromolécule du « polycondensat » est obtenue par soudure de molécules identiques ou différentes, avec perte de matière (généralement de la vapeur d'eau).

Exemple de polycondensat : Le Nylon.

C) Propriétés générales.

1° Nature des liaisons. — Les liaisons covalentes ne sont pas dissociables en ions chargés électriquement comme dans le cas des liaisons élec-

trovalentes. Ce fait permet d'expliquer les propriétés isolantes des composés hydrocarbonés.

2° Nature chimique. — La composition chimique des monomères caractérisée par certains groupements fonctionnels détermine l'activité chimique de la matière plastique, en particulier sa résistance à l'eau, aux acides ou aux solvants.

3° Forme des macromolécules. — Le nombre des liaisons intermoléculaires ainsi que leur nature déterminent une partie des propriétés mécaniques et thermiques.

Les macro-molécules tridimensionnelles sont plus rigides que les chaînes linéaires.

Plus les chaînes sont longues, plus elles sont déformables. C'est le cas des caoutchoucs synthétiques appelés encore « élastomères ».

4° Influence de la température. — Suivant la tenue à la chaleur on classe les matières synthétiques en « thermoplastiques » et « thermodurcissables ».

a) Les « *thermoplastiques* » se ramollissent entre 100 et 150 °C sans modification chimique et reprennent donc leur état initial après refroidissement. Elles sont généralement constituées par des chaînes linéaires (exemples : Plexiglas, Nylon). Le point de ramollissement s'élève avec la masse molaire.

b) Les « *thermodurcissables* » durcissent quand on les chauffe. La polycondensation se poursuit et le phénomène est irréversible. Ce sont des macromolécules tridimensionnelles (exemples : phénoplastes, aminoplastes, alkydes).

5° Solubilité. — Les matières plastiques ont peu de solvants. La solubilité diminue avec la masse molaire. Les composés tridimentionnels sont moins solubles que les composés linéaires. Les solvants ont une grande importance pour l'emploi des vernis et peintures.

6° Vieillissement. — Les propriétés des matières plastiques sont modifiées par l'action des rayons solaires, de l'ozone, de l'air salin ou de la radioactivité. On prévient cette action par addition, lors de la préparation des mélanges, de stabilisants, d'antioxydants, de charges judicieusement choisis. On les rend incombustibles, dans une certaine mesure, par addition de cires chlorées ou d'oxyde d'antimoine.

D) Formes commerciales.

Les phénoplastes sont commercialisés sous trois états :

1° Etat A (Résol). — Liquide formé par dissolution de la matière dans un solvant (peintures, vernis, résines d'imprégnation).

2° Etat B (Résistol). — Poudre, granulés, pastilles constitués par la matière incomplètement polymérisée ou polycondensée. Cet état correspond à un stade intermédiaire de la fabrication.

3° Etat C (Résiste). — Solide obtenu par polymérisation ou polycondensation de l'état B.

Les procédés de mise en forme sont très nombreux. Le moulage par injection permet l'obtention de formes plus ou moins compliquées avec les « thermoplastiques ». Le moulage par compression est utilisé pour les « thermodurcissables ». Le filage permet d'obtenir des profilés, des tubes. Les feuilles sont fabriquées par calandrage. La compression de feuilles de papier ou de tissus imprégnées donne des « stratifiés ».

D'autres procédés permettent d'obtenir des films, des fils pour tissage, des produits mousses.

E) Isolants hydrocarbonés.

1° Les meilleurs isolants en HF.

a) POLYÉTHYLÈNE (POLYTHÈNE. RHODOLÈNE...) (1).

Avantages. — C'est une matière thermoplastique dont la résistivité est très grande (ρ = 300 000 TΩ cm). Ses pertes diélectriques sont faibles (tg δ = 0,0002 à 3 MHz). Il est plus léger que l'eau (ρ = 0,96 kg/dm^3). Le polyéthylène a une plasticité considérable, son allongement pour cent atteint 500. Il est utilisable entre — 120 et + 120 °C. Il est inmouillable et inattaquable par les alcools et les acides.

Inconvénients. — Son prix actuel est assez élevé. Il est très combustible.

Utilisations. — Recouvrement de câbles. Tuyaux. Films pour emballage.

b) POLYTÉTRAFLUORÉTHYLÈNE (TÉFLON, FLUORÉTHÈNE. DIAFLON...).

Avantages. — Le polytétrafluoréthylène est un isolant thermoplastique dont la résistivité est de 10 000 TΩ cm et le facteur de pertes tg δ = 0,0002. Ses pertes diélectriques sont constantes entre 60 Hz et 300 MHz. Il est utilisable entre — 60 °C et + 320 °C. Au-dessus de cette température il dégage des vapeurs très nocives. Il est inmouillable, ininflammable et possède une anti-adhérence exceptionnelle.

Sa résistivité superficielle est élevée même à 100 % d'humidité.

Une autre qualité exceptionnelle est sa résistance aux agents chimiques. Il est inattaquable par tous les corps connus à la température courante (exception faite de la potasse fondue) y compris les moisissures et les champignons.

Inconvénients. — Son prix est élevé et il est incollable. Sa mise en œuvre est délicate.

Utilisations. — Isolement de câbles en très haute fréquence. Joints d'étanchéité. Coussinets et bagues de frottement pour paliers.

c) POLYSTYRÈNE (POLYSTYROL, STYROFLEX, TROLITUL...).

Avantages. — C'est une matière thermo-durcissable de résistivité élevée (ρ = 300 000 TΩ cm). Son facteur de pertes est faible (tg δ = 0,0002)

(1) Les noms entre parenthèses correspondent à des appellations commerciales, lesquelles sont très nombreuses pour certains produits. Elles devraient être évitées, ou tout au moins précédées de l'appellation chimique afin d'éviter les confusions.

à 1 MHz. La rigidité peut atteindre des valeurs importantes (200 à 1 000 kV/cm). Le polystyrène est incolore, facile à mouler et son prix de revient est très bas. Sa masse volumique est faible (1,08 kg/dm³).

Inconvénients. — Il est cassant et ne résiste pas à la chaleur. (Ne pas dépasser 70 à 80 °C. Certaines qualités récentes résistent à l'eau bouillante).

Utilisations. — Diélectrique de condensateurs. Boîtiers et carters moulés. Supports divers pour H.F. et T.H.F.

2° Isolants acceptables en HF.

a) POLYESTERS (MYLAR, MÉLINEX, TERPHANE, TERGAL...).

Les polyesters sont des résines thermodurcissables ayant de bonnes propriétés diélectriques, une bonne stabilité dimensionnelle et une haute résistance à la plupart des solvants, acides, bases ou sels.

Ils possèdent une forte résistance à l'abrasion et aux intempéries. Ils ont une bonne transparence aux ondes ultra-courtes. Ils permettent l'obtention de statifiés de grande dureté et rigides avec nappes de fibres ou de textiles de verre.

Utilisations. — Diélectrique de condensateurs pour haute température. Stratifiés verre-polyester. Dômes de radar pour avions. Vernis sans solvant pour imprégnation ou enrobage.

b) RÉSINES ACRYLIQUES (PLEXIGLAS, PLEXANE...).

Ce sont des matières thermoplastiques telles que le polyméthacrylate de méthyle (Plexiglas). Cette résine a une faible masse volumique (1,18 kg/dm³).

Elle se ramollit à 110 °C et a une inflammabilité faible. Douée de bonnes propriétés mécanique elle a une transparence supérieure à celle du cristal.

Elle se laisse difficilement entailler par les outils tranchants mais par contre se raye facilement.

Utilisations. — Isolants en panneaux et plaques pour émetteurs. Panneaux insonorisants. Maquettes pour études photoélasticimétriques permettant l'étude des contraintes mécaniques. Habitacles d'avions. Lentilles optiques.

c) RÉSINES ETHOXYLINES OU POLYÉPOXYDES (ARALDITE, EPIKOTE...).

L'Araldite est remarquable pour son extraordinaire pouvoir adhésif sur les supports les plus divers en particulier sur les métaux. Elle est très stable aux agents chimiques. Elle peut être moulée et présente d'excellentes propriétés électriques. A la fabrication il faut prendre des précautions particulières car les solvants utilisés donnent des vapeurs toxiques.

Utilisations. — Colles pour assemblages de plastiques sur métaux ou de métaux sur métaux. Vernis de protection. Masse de remplissage et d'enrobage pour de nombreux appareillages devant travailler sous des climats tropicaux, en particulier les condensateurs et les transistrons.

d) POLYURÉTHANE.

Cette résine se volatilise à 380 °C sans laisser aucune cendre. En émail elle permet la soudure à l'étain de fils sans décapage. On réalise ainsi d'excellentes soudures sur les fils divisés utilisés dans les bobinages HF.

La mousse de polyuréthane est utilisée comme suspension de cône de haut-parleur.

3° Isolants BF.

a) RÉSINES FORMOPHÉNOLIQUES (BAKÉLITE, CRISTALLEX, PROGILITE...).

La Bakélite est une résine thermo-durcissable faisant partie des « phénoplastes ».

Etat A. — Le produit est liquide et la résine est en solution dans un solvant alcoolique.

Etat B. — Obtenue par chauffage à 110 °C de Bakélite A. Elle n'est pas complètement polycondensée et constitue un stade intermédiaire de fabrication (poudre, granulés, pastilles).

Etat C. — Obtenue par chauffage à 180 °C de Bakélite B. Elle est dure, infusible, insoluble de teinte foncée.

Les propriétés mécaniques, physiques et chimiques de la Bakélite sont excellentes. Sa résistance à la traction est de l'ordre de 5 à 8 daN/mm^2. Ses qualités électriques remarquables ont permis un large usage en électricité et en basse fréquence. Pour améliorer ses qualités en haute fréquence on lui incorpore une charge de mica et de silice (Bakélite HF de teinte jaune).

L'imprégnation de nappes de papier ou de tissus permet la fabrication de stratifiés de haute résistance mécanique dont l'un des plus connus est « le Céloron » (Bakélite-coton).

Utilisations. — Vernis d'imprégnation de bobinages. Protection de résistances, condensateurs. Nombreuses pièces moulées telles que boîtiers d'interrupteurs, supports de tubes, ébénisteries, etc... Stratifiés découpés : engrenages, rondelles isolantes. Supports de circuits imprimés. Spider de H.P. La Bakélite HF est utilisée pour des supports de tubes en HF ou pour la protection de condensateurs.

b) POLYCHLORURE DE VINYLE. (Vendu commercialement sous un très grand nombre d'appellations : AFCOVYL, GOBINYL, LUCOGEL, LUCOFLEX, LUCOLÈNE, RHODOPAS, RHOVILITE, AFCODUR...).

C'est une résine « vinylique » thermoplastique fabriquée sous une grande variété de couleurs. Elle est insensible aux agents chimiques et au vieillissement à l'ozone et ne transmet pas la flamme. On obtient des moulages ou des revêtements souples. Il supporte mal la chaleur. On ne doit pas dépasser 60 °C environ.

Utilisations. — Revêtement de câbles ou fils électriques. Fabrication de boîtiers d'interrupteurs, de prises de courant. Revêtement protecteur de

tôles métalliques (Skinplate). Mousse « Klégécell » pour l'isolation thermique, phonique ou pour l'amortissement de vibrations.

c) AMINOPLASTES (CIBANITE, POLLOPAS, URANITE...).

Ce sont des résines thermodurcissables à base d'urée-formol ou mélamine-formol. Leurs propriétés sont semblables à celles de la Bakélite avec une résistance à la chaleur supérieure (Point de ramollissement : 150 °C).

Utilisations. — Vernis d'imprégnation stratifiés verres, papier ou tissus de grande résistance. Isolants pour appareillage de coupure soumis aux arcs électriques. Panneaux isolants.

4° Autres isolants.

a) PARAFFINE.

La paraffine est une cire synthétique obtenue lors de la distillation du pétrole. Elle a une résistivité moyenne de 10^4 TΩ cm et un facteur de pertes $\operatorname{tg}\delta = 0{,}01$ ce qui en permet l'emploi pour l'imprégnation de bobinages en moyenne fréquence et pour l'imprégnation du papier utilisé dans des condensateurs BF. Les paraffines chlorées ou fluorées ont des qualités meilleures.

b) ELASTOMÈRES SYNTHÉTIQUES.

Ils sont nombreux (Thiokol, AXF, GRS, Néoprène, Butyl, Buna, polyisobutylène). Seuls le Néoprène et le caoutchouc Butyl sont utilisés comme isolants de câbles car ils ont une résistance meilleure aux agents atmosphériques que le caoutchouc naturel.

c) POLYAMIDES (NYLON, RILSAN).

Le Nylon est obtenu à partir de la houille, et le Rilsan à partir de l'huile de ricin. Ce sont des thermoplastiques.

Leurs qualités isolantes médiocres en H.F. limitent leurs utilisations.

Les applications importantes sont réservées à des pièces mécaniques moulées (engrenages, carcasses de bobines, coussinets, joints, capots de relais, pièces d'interrupteurs) ou à des produits tissés pour lesquels on recherche la solidité maximale pour le plus faible poids.

d) ALKYDES.

Ce sont des résines qui peuvent être moulées mais elles servent surtout à la fabrication des vernis et peintures glycérophtaliques qui ont une grande dureté et une bonne résistance aux intempéries. Elles constituent la base de tous les vernis à séchage rapide.

e) ACÉTATE DE CELLULOSE (RHODOÏD).

Il donne des pellicules très minces. Malgré sa faible résistance à la chaleur il est très utilisé pour les films cinématographiques, l'emballage et l'enrubanage de câbles électriques.

TABLEAU 4.3. — CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DES ISOLANTS

	ρ à 20 °C ($T\Omega$ cm)	tg δ à 1 MHz	ε_r	Rigidité moy. (kV/cm)	t_{max} d'utilisation (°C)
Air sec	$\approx \infty$	≈ 0	≈ 1	40	—
Quartz fondu	5×10^6	0,0001	4,5	200	1 000
Polyéthylène	300 000	0,0001	2,2	180	80
Polystyrène	300 000	0,0002	2,6	500	80
Verre au plomb	90 000	0,009	5	100	300
Ozokérite	44 000	0,001	2,15	140	70
Paraffine	34 000	0,001	1,9 à 2,3	120	40
Polytétrafluoréthylène	10 000	0,0002	2	170	250
Caoutchouc pur	10 000	0,006	2 à 2,8	200	—
Mica	100 à 10 000	0,001	6,5 à 9	700	600
Rilsan	3 000	0,03	—	160	140
Araldite	3 000	0,01	4	200	—
Porcelaine	10 à 1 000	0,005	4,38	60	800
Stéatite	100	0,003	5,9	250	800
Titanate de magnésium	100	0,002	15	60	1 300
Titanate de baryum-strontium	10	0,025	1 000 à 10 000	40	1 500
Titanate de baryum	10	0,001	1 000	50	1 300
Huile de transformateur	5	0,0008	2,7	—	—
Bakélite HF	1	0,007	5,3	200	110
Bakélite ordinaire	0,2	0,01	7 à 8	200	100
Polychlorure de vinyle	1	0,01	5 à 5,6	200	80
Papier ordinaire	0,05	0,005 à 0,03	2 à 5	200	70
Silicone	100	0,005	4	400	250

Nota. — Les nombres donnés correspondent à des valeurs moyennes car des résultats différents peuvent être obtenus selon les conditions de la mesure (humidité pour tg δ, épaisseur du diélectrique pour la rigidité, etc...) et selon la composition exacte du produit (verre, porcelaine, mica, etc...).

TABLEAU 4.4. — CARACTÉRISTIQUES DES STRATIFIÉS

	Papier phénolique	Coton phénolique	Verre phénolique	Verre mélamine	Verre polyester	Verre silicone	Verre époxy
Résistivité superficielle (TΩ cm) .	0,001	0,00001	1	1	200	100	1 000
Résistivité transversale (TΩ cm) .	0,01	0,0001	10	10	10 000	1 000	100 000
Rigidité diélectrique à 20 °C (kV/mm)	25	7	7	10	26	10	20
tg δ à 1 MHz	0,1 à 50 Hz	0,05 à 50 Hz	0,3	0,3	0,014	0,003	0,03
Permittivité	5	5	3,7	0,2	4,2	4,2	5
Résistance à la traction (daN/mm²) .	12	10	10	9 à 12	15 à 30	12 à 20	15 à 30
Absorption d'eau (%)			2,5	2,5	0,05 à 0,1	0,05 à 0,1	0,1 à 0,3
Température limite (°C)	120	120	160	140	180	180	160

Nota. — Les résistivités sont mesurées à 20 °C pour 60 % d'humidité relative.

F. Silicones.

1° Généralités.

La couche périphérique de l'atome de silicium contient comme le carbone quatre électrons périphériques. La chimie du silicium doit donc en principe présenter les mêmes possibilités que celle du carbone. Néanmoins la richesse des composés du silicium n'atteint pas celle du carbone car les couches internes de l'atome de carbone présentent certaines caractéristiques qui lui permettent d'avoir des doubles ou triples liaisons covalentes ce qui n'est pas le cas pour le silicium.

Aux chaînes hydrocarbonées qui constituent l'ossature des macromolécules organiques habituelles, se trouvent substituées des chaînes silicium-oxygène auxquelles sont fixés divers radicaux carbonés.

La présence de silicium confère aux produits obtenus, une résistance chimique améliorée et une meilleure tenue aux hautes et basses températures.

Les radicaux CH_3 ou groupes « méthyle » qui sont fixés aux chaînes apportent aux silicones leur hydrophobie due aux faibles forces intermoléculaires qui en émanent.

2° Propriétés.

— Bonnes propriétés électriques : Résistivité $\rho = 100$ TΩ cm. Facteur de pertes $\operatorname{tg}\delta \approx 0{,}005$.

— Grande stabilité thermique : Elles peuvent être utilisées en général entre 70 °C et 250 °C.

— Hydrophobie exceptionnelle : C'est-à-dire qu'elles ne sont pas mouillables par l'eau.

— Excellente inertie chimique : Elles ont une bonne tenue aux agents atmosphériques, elles brûlent très mal ou sont incombustibles.

— Elles sont anti-adhérentes et anti-mousse.

3° Applications.

a) Lubrifiants.

Huiles ou graisses de silicones pour matériel tropicalisé (conducteur variables, potentiomètres). Certaines graisses servent à l'isolement des raccords de câbles électriques.

b) Vernis.

Ils sont utilisés pour l'imprégnation de bobinages, l'isolation du matériel tropicalisé par trempage ou projection au pistolet. Dans les vernis ou peintures les silicones entrent comme adjuvants ou liants.

c) Fluides de silicones.

Ils sont utilisés pour leurs propriétés hydrofuges dans l'imperméabilisation de textiles naturels ou synthétiques.

On en recouvre d'une pellicule les moules pour faciliter le démoulage des objets en caoutchouc ou en matières plastiques, les verres ou céramiques exposés en atmosphère humide, les sillons de disques phonographiques pour les protéger.

d) Résines de silicones.

Utilisées pour la fabrication de stratifiés à base de tissu de verre ou d'amiante permettant d'obtenir des panneaux d'excellentes propriétés mécaniques et électriques.

e Caoutchoucs de silicones (silastic).

Les élastomères obtenus sont particulièrement résistants au froid et à la chaleur. Ils servent à la réalisation de joints ou à l'isolement de câbles et la fabrication de souplisseaux. Leur prix est relativement élevé.

Des élastomères vulcanisant à température ambiante permettent sans manipulation spéciale le trempé, l'enrobage, le remplissage, l'encapsulage.

f) Pate visqueuse (silastène).

Elle est utilisée comme matière de remplissage, pour l'enrobage, la confection de joints, de moules, etc. On la polymérise à froid à l'aide d'un catalyseur incorporé au moment de l'emploi.

V. NORMES.

NF C 26-120. Produits micacés, 1958.
UTE C 26-130. Cartons isolants, 1958.
NF C 26-140. Toiles vernies, 1937.
UTE C 26-150. Isolants stratifiés phénoplastes, 1959.
UTE C 26-25. Aptitude au poinçonnage des isolants (1963).
NF T 51-001, à 51-013. Matières plastiques : méthodes d'essais.
SITEL 304. Verres spéciaux et émaux destinés à la fabrication des tubes électroniques semi-conducteurs et autres éléments assimilés. Spécifications techniques. Règles de contrôle (1957).
FNIE 009. Feuilles d'isolants stratifiés phénoplastes à base de papier utilisées en radioélectricité (1959).
FNIE 014. Feuilles d'isolants stratifiés à base de fibre de verre et de résine époxide utilisées en radioélectricité (1960).
SNIR 003. Caractéristiques des feuilles d'isolants stratifiés XXXP recouvertes de feuilles de cuivre, 1957.

CHAPITRE 5

UTILISATION DES MATÉRIAUX

I. FILS.

A) Fils rigides nus.

Ils sont peu utilisés du fait de leur manque de protection. On emploie le cuivre électrolytique recuit, excellent conducteur, peu cassant, dont les diamètres courants sont compris entre 0,8 mm et 2 mm.

Il peut être étamé pour favoriser la soudure. On peut l'isoler au moyen de gaines (« souplisso ») en soie ou coton huilé, ou en matière plastique (résine vinylique, caoutchouc de silicone).

Les diamètres vont de 0,02 mm à 2 mm.

B) Fils isolés.

1° Fils émaillés :

Après un tréfilage soigné éliminant toute variation de diamètre et irrégularité, le fil subit un recuit puis est recouvert de plusieurs couches de vernis polymérisé dans un four électrique.

Le choix du vernis dépend de la fréquence et de la température qui sera supportée par le fil. Il doit posséder de bonnes qualités mécaniques.

2° Fils guipés :

Pour compléter l'isolement, en particulier pour les bobinages en nid d'abeilles, on recouvre le fil d'un guipage de soie peu encombrante et ayant de faibles pertes en H.F.

3° Fils gainés :

Ils sont isolés par une gaine de polychlorure de vinyle aux couleurs variées en basse fréquence ou de polyéthylène en haute fréquence.

4° Fils divisés :

Ce sont des fils utilisés en HF jusqu'à 1 MHz afin de réduire les pertes par effet pelliculaire. Ils sont constitués de 3 à 30 brins émaillés de 5 ou

6 centièmes de millimètres torsadés et soudés entre eux aux extrémités. Ils sont recouverts d'une résine polyuréthane qui s'évapore lorsqu'on trempe les fils dans un bain d'étain permettant ainsi une liaison parfaite entre les brins aux extrémités.

5° Fils argentés :

Ils sont utilisés au-dessus de 3 MHz sur appareils professionnels afin de réduire les pertes par effet pelliculaire.

II. CABLES.

Un câble est un ensemble de conducteurs électriquement distincts et mécaniquement solidaires.

1° Câbles isolés :

L'âme est généralement constituée de plusieurs brins câblés ensemble. Pour des connexions temporaires les conducteurs sont noyés dans une matière plastique souple, ou, dans le cas de protection plus soignée, ils sont protégés par plusieurs guipages et enrobages de caoutchouc vulcanisé.

2° Câbles blindés :

Ils sont obtenus en recouvrant le câble isolé d'une tresse métallique étamée ou cadmiée, pour faciliter la soudure des prises de masse. La distance entre le conducteur et le blindage doit être supérieure à 1 mm, pour limiter les pertes capacitives.

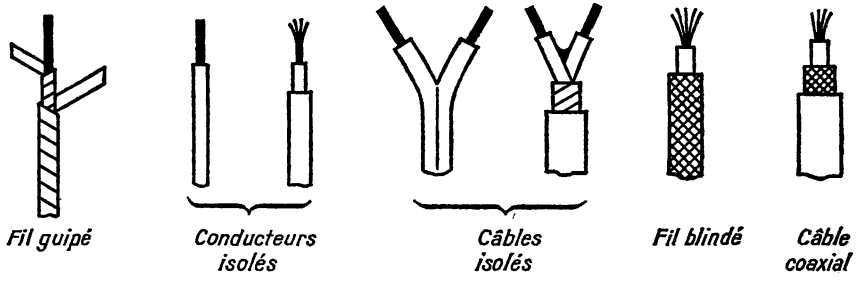


Fig. 5-1 à 7
Fils et câbles

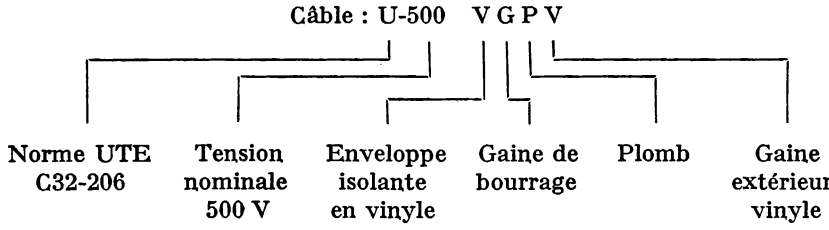
3° Câbles coaxiaux :

Ils sont constitués d'un conducteur central (âme massive ou câblée) et d'un conducteur périphérique en tresse de cuivre. Les deux conducteurs sont séparés par un diélectrique en polyéthylène ou constitué par des perles en stéatite. Les impédances caractéristiques sont de 50-75-100-150 ou 300 Ω. Leur capacité est comprise entre 50 et 100 pF/m.

C) Normalisation.

La dénomination d'un conducteur est composée du symbole U si elle est conforme à la norme UTE, suivi d'un groupe de chiffres indiquant la tension nominale, de la lettre S si le conducteur est souple (son absence signifie que le conducteur est rigide) et enfin d'un groupe de lettres (ou de chiffres) représentant la nature des éléments constitutifs dans l'ordre depuis l'âme jusqu'au revêtement extérieur.

Exemple :



Le tableau suivant donne la signification des lettres et des chiffres.

Elément constitutif	Symb.	Signification	Observations
Ame.	A	Aluminium.	L'absence de cette lettre = cuivre.
Enveloppe isolante.	B C Ç N R V	Caoutchouc butyl vulcanisé. Caoutchouc vulcanisé. Caoutchouc pur. Polychloroprène. Polyéthylène réticulé. Polychlorure de vinyle.	Le chiffre 2 ou 3 placé avant cette lettre indique que l'enveloppe isolante est épaisse (2) ou très épaisse (3).
Bourrage.	G O 1	Matière élastique ou plastique formant bourrage. Aucun bourrage, ou bourrage en textile ou autre ne formant pas gaine. La gaine d'assemblage et de protection forme bourrage.	Si dans un câble à plusieurs conducteurs ne figure pas un de ces symboles, il s'agit d'une torsade de conducteurs.

Elément constructif	Symb.	Signification	Observations
Gaines de protection (non métalliques).	C N V	Caoutchouc vulcanisé. Polychloroprène. Polychlorure de vinyle.	Le chiffre 2 ou 3 placé avant la lettre de la gaine indique gaine épaisse ou très épaisse; il est placé après le chiffre 1 si la gaine forme bourrage.
Revêtements métalliques de protection.	P F Z	Plomb. Feuillards ou fils d'acier. Zinc.	Ces revêtements métalliques peuvent être extérieurs ou couverts d'une gaine.
Gaine extérieure sur revêtement métallique.	N V	Polychloroprène. Polychlorure de vinyle.	
Revêtement textile extérieur.	T	Tresse, tricot ou ficelles.	
Assemblage.	M	Signifie que les conducteurs sont assemblés en forme méplate.	

III. ORGANES DE JONCTION.

A) Définitions.

— **Connecteurs** : nom générique englobant les termes ci-dessous.
— **Fiche** : connecteur mâle.
— **Prise** : connecteur femelle.
— **Broche** : contact mâle d'une fiche.
— **Douille** : contact femelle d'une prise.
— **Raccord** : connecteur destiné à relier des fiches et des prises.
— **Borne** : pièce destinée à relier un conducteur interne d'un appareil à un conducteur externe.

B) Supports de tubes et transistors.

Les types diffèrent suivant les conditions d'utilisation :

— matériel « grand public » ou professionnel,
— basses ou hautes fréquences,
— avec ou sans blindage,
— câblage classique ou circuit imprimé,
— type de tube ou de transistor utilisé.

Nous donnons aux figures 5-8 à 13 des exemples utilisés pour les tubes « noval » et les transistors.

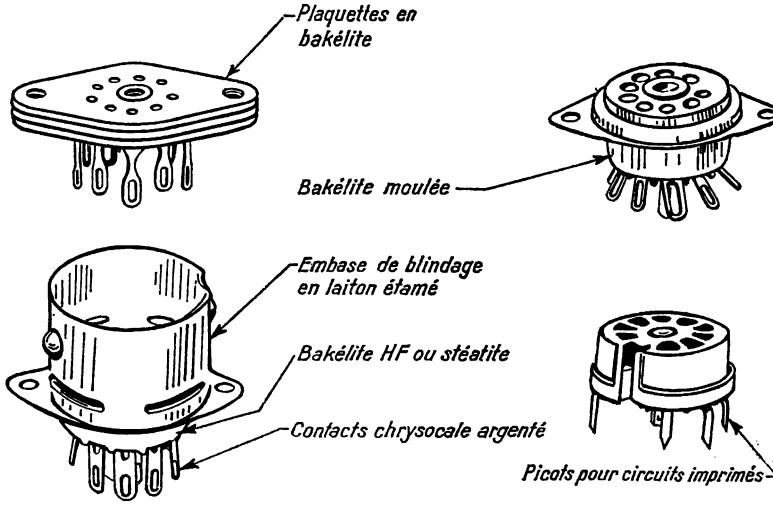


Fig. 5-8 à 11
Supports de tubes « Noval »

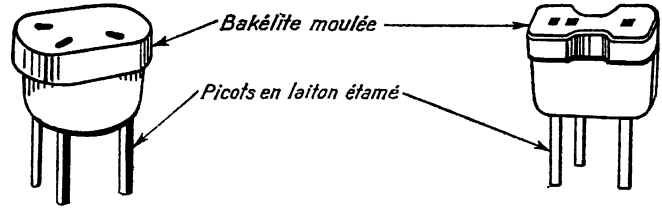


Fig. 5-12 et 13
Supports de transistors

En basses fréquences l'isolant est une résine phénoplaste et en hautes fréquences de la Stéatite ou de la Bakélite HF contenant une charge minérale (mica).

C) Connecteurs.

Les types et modèles utilisés sont extrêmement nombreux. Les figures 5-14 à 5-42 montrent des exemples parmi le matériel le plus courant.

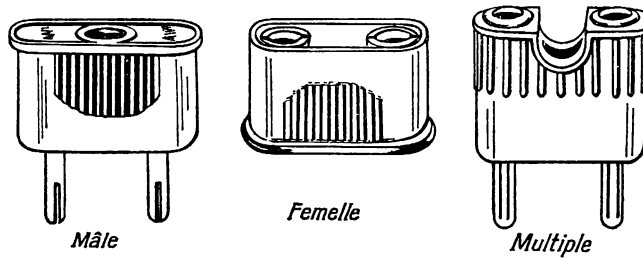


Fig. 5-14 à 16
Prises secteur

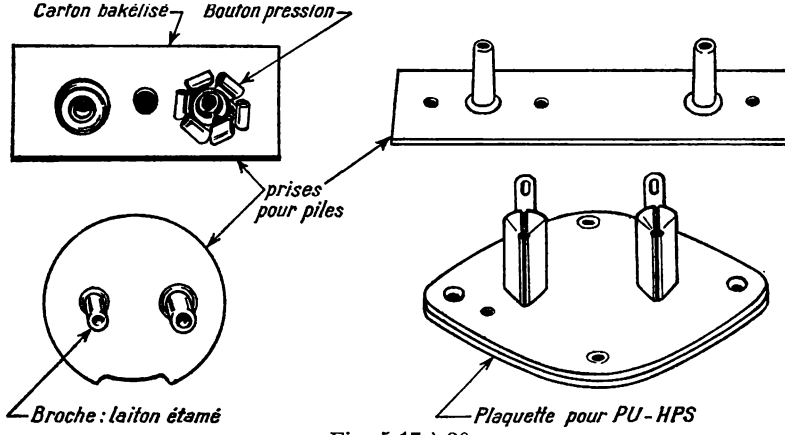


Fig. 5-17 à 20
Prises diverses

Fig. 5-21 et 22
Fiche et prise pour antenne « auto »

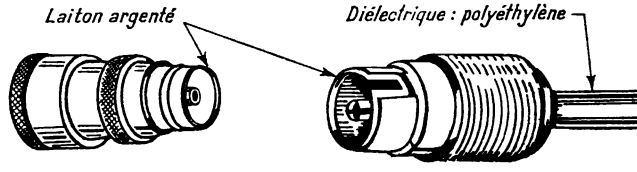


Fig. 5-23 et 24
Fiche et prise coaxiale

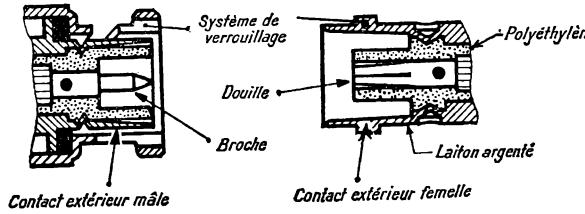


Fig. 5-25 et 26

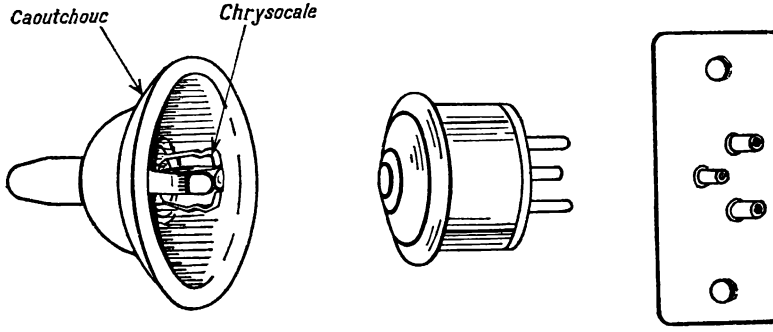


Fig. 5-27 Prise pour anode postaccélératrice

Fig. 5-28 et 29 Prise et fiche miniatures

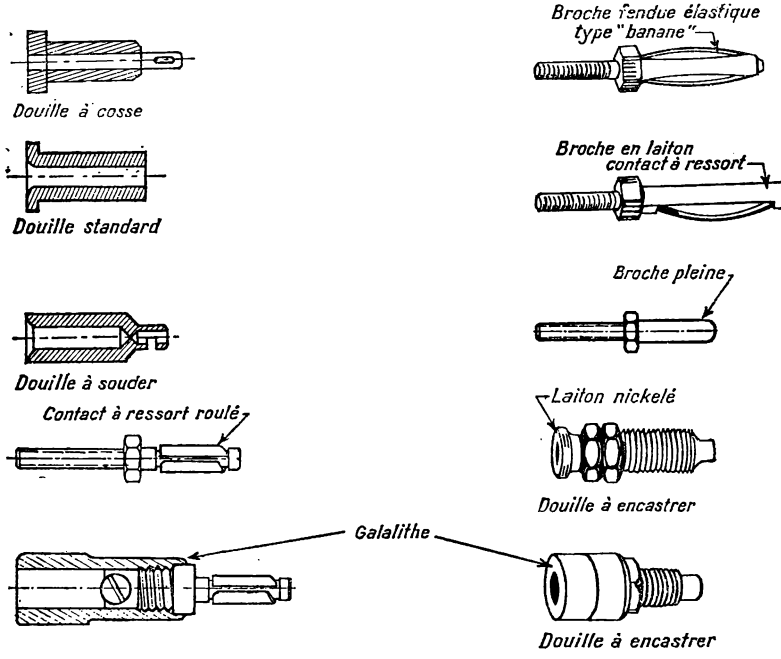


Fig. 5-30 à 39 Fiches et douilles diverses

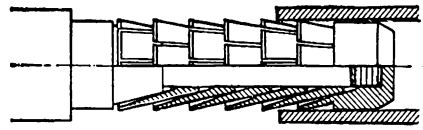


Fig. 5-40
Fiche à contacts élastiques multiples

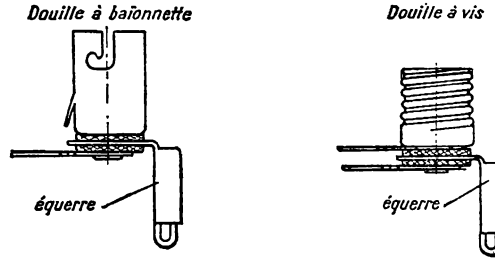


Fig. 5-41 et 42
Douilles pour lampes de cadran

En basses fréquences les isolants utilisés sont des résines phénoplastes, aminoplastes, de la Galalithe, du Rilsan; en hautes fréquences de la Stéatite, du polyéthylène.

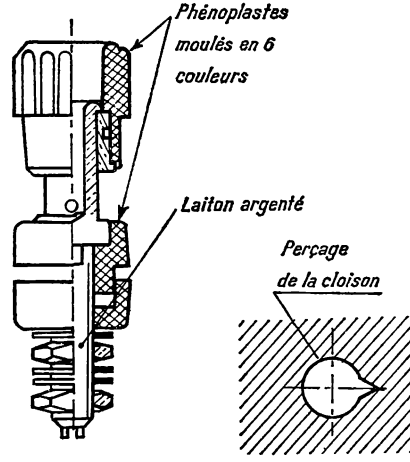


Fig. 5-43
Bornes P et T : 15 et 25 A

Les broches et douilles sont en laiton, éventuellement étamé pour faciliter des soudures ou nickelées contre la corrosion ou pour des raisons d'esthétique.

Lorsque les contacts doivent être élastiques on utilise le bronze chrysocale.

D) Relais (fig. 44 à 47).

Ils permettent la soudure de fils conducteurs de façon à assurer soit des connexions, soit la rigidité du câblage.

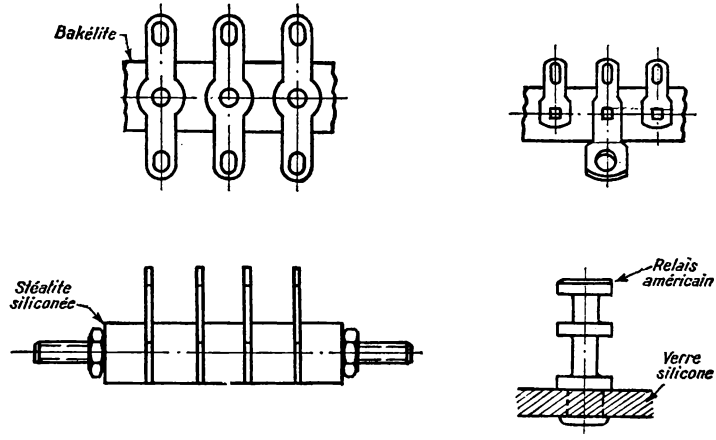


Fig. 5-44 à 47
Relais

Ils sont fabriqués en séries normale ou miniature, en bandes avec des cosses de grandeur ou de forme variables. Le support est soit en Bakélite en basse fréquence, soit en Bakélite à charge minérale en haute fréquence, soit en stratifié verre silicone en matériel professionnel.

Il existe des relais spéciaux sur Stéatite ou des relais américains en laiton décolleté sur plaque verre-silicone.

E) Traversées.

On utilise des passe-fils pour éviter la coupure de l'isolant de fil ou de câble par les arêtes vives métalliques des plaquettes métalliques (fig. 5-48 à 50).

Fig. 5-48 à 50
Passe-fils

Pour isoler les conducteurs au passage des parois et des cloisons métalliques, on utilise des traversées en Bakélite, en verre dans le cas d'étanchéité (fig. 5-51), en Stéatite pour de fortes intensités.

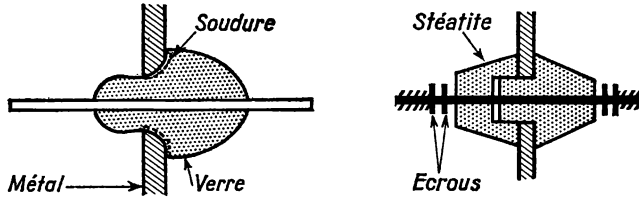


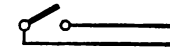
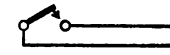
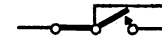
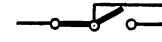
Fig. 5-51 et 52 Traversées isolantes

IV. ORGANES D'INTERRUPTION.

A) Interrupteurs - Inverseurs.

Ce sont des appareils destinés à établir ou à couper le courant électrique qui traverse un circuit électrique. Les contacts sont en cuivre ou mieux en alliage d'argent, éventuellement en alliage d'or. Ces contacts sont brasés ou déposés sur des supports en cuivre, laiton chrysocale ou maillechort. Le contact électrique est obtenu par une pièce basculante maintenue en pression par un ressort. Tous ces systèmes sont à rupture brusque. Ils peuvent être aussi utilisés en « inverseurs » suivant les dispositions du tableau 5-2.

TABLEAU 5-2

Interrupteur Unipolaire	
Interrupteur Unipolaire à rappel (repos contact)	
Interrupteur Unipolaire à rappel (repos coupé)	
Inverseur sans arrêt au centre un côté momentané	
Inverseur sans arrêt au centre	
Inverseur avec contacts momentané dans les deux sens	
Inverseur avec arrêt au centre un côté momentané	
Inverseur avec arrêt au centre	

Les principaux types sont :

— interrupteur à levier (fig. 5-53),
— interrupteur à poussoir (fig. 5-54),
— interrupteur basculant (fig. 5-55),
— interrupteur à lames (fig. 5-56 et 5-57).

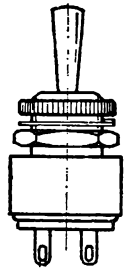


Fig. 5-53
Interrupteur à levier

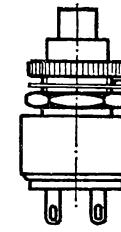


Fig. 5-54
Interrupteur à poussoir

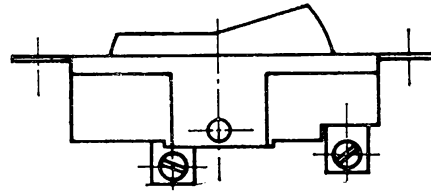


Fig. 5-55
Interrupteur basculant

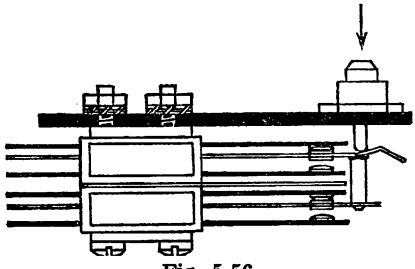


Fig. 5-56
Interrupteur à lames

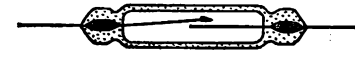


Fig. 5-57
Interrupteur à lames souples

La commande peut s'effectuer manuellement ou indirectement par galet et lame souple, par aimant basculant ou électro-aimant. Les interrupteurs à lames souples (fig. 5-57) sont employés partout où il est nécessaire d'avoir un dispositif à haute vitesse de commutation petit et simple présentant une très longue durée de vie sans aucun entretien.

Sur les récepteurs de radio on utilise des interrupteurs commandés par une languette associée à l'axe d'un potentiomètre.

B) Commutateurs.

Le commutateur est un appareil électrique à deux ou plusieurs contacts permettant d'orienter à volonté un courant dans un circuit ou dans un autre. Lorsque les combinaisons sont plus compliquées et variées l'appareil porte le nom de combinateur ou de contacteur.

Dans les récepteurs radioélectriques ils permettent la mise en circuit des bobines et condensateurs relatifs aux diverses gammes d'ondes. Ils doivent être de bonne qualité et robustes avec des contacts argentés excellents. Les supports sont en Bakélite sur le matériel grand public et en Stéatite avec vernis silicone sur matériel professionnel.

Les pièces métalliques sont cadmiées bichromatées et les pièces élastiques en chrysocale.

La commande se fait par rotation avec verrouillage par bille (fig. 5-58) ou par bouton-poussoir (fig. 5-59).

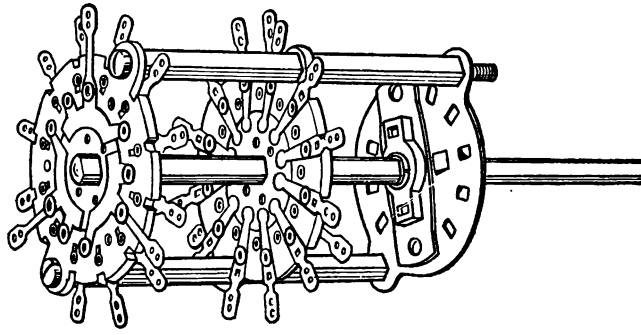


Fig. 5-58
Contacteur rotatif

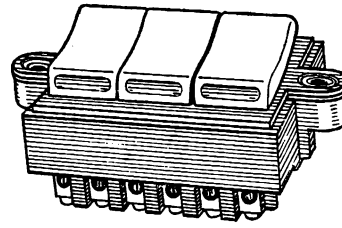


Fig. 5-59
Commutateur à poussoir

V. RELAIS ELECTROMAGNÉTIQUES.

A) Généralités.

Un relais est un appareil destiné à ouvrir ou fermer un ou plusieurs circuits lorsque certaines conditions préalablement déterminées se réalisent dans le même circuit ou dans un autre circuit. Les conditions de fonction-

nement sont très variées : intensité, tension, fréquence, ou tout autre facteur physique tel que pression, température, temps, vitesse, niveau, etc.

Les utilisations des relais sont très variées : protection de circuit, mise en route, télécommande, automatisation, signalisation, contrôle. Le plus souvent l'élément moteur est un électro-aimant (relais électromagnétique), son action pouvant être instantanée ou retardée.

B) Description (fig. 5-60).

Le relais électromagnétique comporte un élément moteur constitué par un électro-aimant à armature pivotante, un élément de travail constitué par des contacts et un ressort de rappel pour le retour en position de départ après travail.

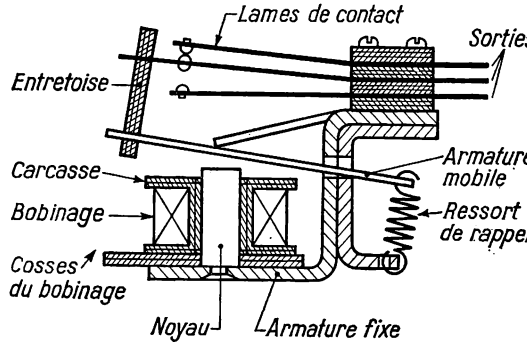


Fig. 5-60
Relais électromagnétique

En courant continu le circuit magnétique est massif en acier doux ou extra-doux avec noyau cylindrique. En courant alternatif le circuit magnétique est feuilleté en acier au silicium, la section dans ce cas étant carrée.

Pour les intensités inférieures à dix ampères on emploie un fil de bobinage émaillé enroulé sur une carcasse en carton presspahn, en Nylon ou en Rilsan.

C) Fonctionnement.

La figure 5-61 indique quelle est la variation de l'intensité d'un électro-aimant à courant continu alimenté sous tension constante.

1° Fermeture :

A l'instant t_0 le courant croît d'abord rapidement de 0 à I_f sans que l'armature mobile bouge; à l'instant t_1, le courant I_f étant suffisant pour que l'armature soit attirée, la fermeture se produit entre les instants t_1 et t_2; mais la réduction de l'entrefer produit une diminution de la réluctance du circuit magnétique, d'où une augmentation de l'inductance. Le courant cesse alors de croître pendant un court instant. Quand la fermeture est terminée à l'instant t_2, le courant augmente de nouveau, mais moins rapidement car l'inductance est plus élevée. Il se stabilise à la valeur de régime I_n.

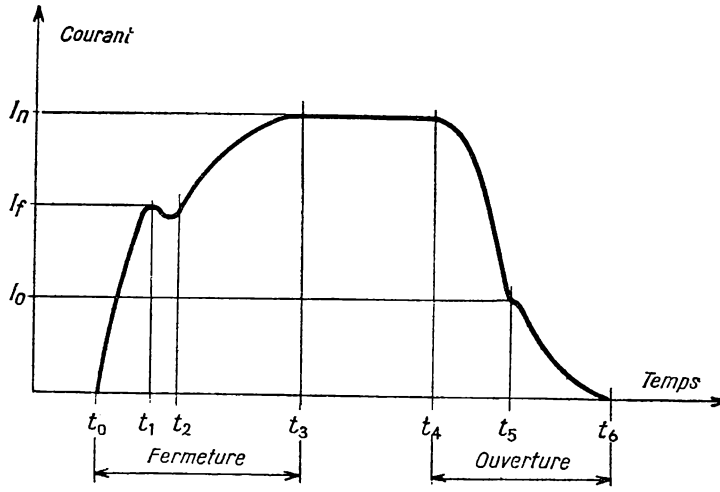


Fig. 5-61
Variation du courant

2° Appareil fermé :

On voit que I_n est très supérieur à I_f nécessaire pour fermer l'armature mobile; on peut donc, après enclenchement, réduire I_n sans danger; d'où possibilité d'intercaler par contact auxiliaire automatique une résistance d'économie.

3° Ouverture :

A l'ouverture à l'instant t_4, le courant décroît rapidement; lorsqu'il atteint la valeur I_0 inférieure à I_f, l'armature est libérée et s'ouvre sous l'action des ressorts de rappel. Le courant décroît ensuite rapidement jusqu'à zéro.

4° Réglage du temps de fonctionnement :

Si on augmente la tension, le temps d'enclenchement (t_2-t_1) est réduit, mais le retard au déclenchement (t_5-t_4) est augmenté. Si on diminue la résistance de l'enroulement, sans changer le nombre de spires, on obtient le même résultat; si on augmente la résistance de l'enroulement, sans changer le nombre de spires, on obtient le résultat inverse.

D) Caractéristiques.

1° Différents modèles. — Il existe des modèles nu, en boîtier, avec raccordement par cosses à souder, picots, culot octal ou connecteur. L'électro-aimant est à armature pivotante ou à noyau plongeur.

Certains modèles professionnels sont montés sous vide.

2° Bobine :

Elle peut être alimentée sous tension continue ou alternative de valeurs 6 - 12 - 24 - 48 - 127 ou 230 V.

3° Contacts :

— une direction contact repos,
— une direction contact travail,
— deux directions (inverseur),
— à combinaisons et contacts multiples.

4° Autres caractéristiques :

— Pouvoir de coupure : 1 à 10 A sous 115 V.
— Temps de fermeture ou d'ouverture : 10 à 100 ms.
— Plage de température — 25 + 70 °C ou — 40 + 85 °C.
— Puissance d'alimentation : 0,5 W à 5 W.

CHAPITRE 6

LES RÉSISTANCES FIXES

I. GÉNÉRALITÉS.

A) Définition.

La résistance (en courant continu) est le quotient d'une différence de potentiel constante appliquée aux extrémités d'un conducteur par l'intensité du courant qu'elle y produit lorsque le conducteur n'est le siège d'aucune force électromotrice. « Vocabulaire électrotechnique NF C 01-005 ».

Une résistance est un ensemble de conducteurs dont on utilise spécialement la résistance.

B) Rappel de formules.

1° Résistance d'un conducteur de section constante :

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

R : résistance en Ω ρ : résistivité en Ω m.
l : longueur du conducteur en mètres.
s : section du conducteur en m².

2° Résistivité d'un conducteur métallique à la température t :

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

ρ_t : résistivité à la température t °C.
ρ_0 : résistivité à la température 0 °C.
α : coefficient de température (positif).

3° Puissance dissipée par une résistance :

$$P = RI^2$$

R en ohms, I en ampères, P en watts.

4° Energie dégagée pendant le temps t :

$$W = RI^2 t$$

R en ohms, I en ampères, t en secondes, W en joules.

Pour obtenir l'énergie en calories, multiplier W par 0,24.

Les formules ci-dessus sont applicables en alternatif en remplaçant l'intensité du courant continu par l'intensité efficace.

5° Association de résistances :

$$\text{en série, } R = \Sigma\, r$$

$$\text{en parallèle, } \frac{1}{R} = \Sigma\, \frac{1}{r}\,.$$

C) Terminologie.

1° Résistance nominale R_n.

C'est la valeur de la résistance pour laquelle l'élément a été établi.

2° Tolérance sur la résistance nominale.

Ce sont les écarts en pourcentage que la valeur de la résistance réelle ne doit pas dépasser par rapport à la résistance nominale R_n.

3° Puissance nominale P_n ou dissipation nominale.

C'est la puissance en watts que l'élément peut dissiper d'une façon continue sans subir de détérioration à la température nominale de service.

4° Tension nominale U_n.

C'est la tension continue correspondant à la dissipation nominale et à la résistance nominale ($U_n = \sqrt{P_n\, R_n}$).

5° Tension maximale de service U_{max}.

C'est la tension continue ou alternative efficace à 50 Hz à ne pas dépasser en service continu à la température nominale de service.

6° Température nominale de service.

C'est la température ambiante à laquelle est définie la dissipation nominale.

7° Température maximale de service.

C'est la température ambiante maximale à laquelle peut être utilisée la résistance. A cette température la résistance ne peut plus dissiper de puissance (fig. 6-1).

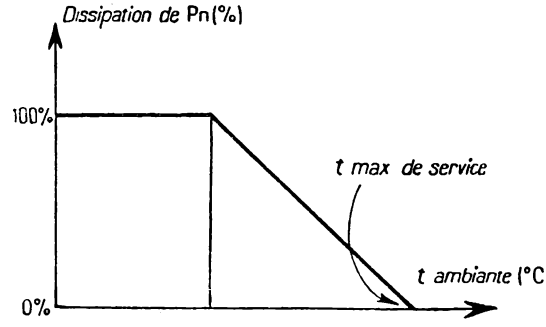


Fig. 6-1
Courbe de dissipation

8° Coefficient de température $\alpha = \dfrac{\Delta R}{R\,\Delta t}$.

C'est le quotient de la variation relative de la résistance par la variation de température. Il s'exprime en millionièmes par degré.

9° Coefficient de tension : $\dfrac{\Delta R}{R\,\Delta U}$.

C'est le quotient de la variation relative de la résistance par la variation de tension qui la provoque.

10° Caractéristique de fréquence.

C'est la courbe représentant la variation de la résistance en H.F. en fonction de la fréquence.

11° Résistance isolée.

C'est la résistance à laquelle sont applicables les essais de résistance d'isolement et de rigidité diélectrique.

12° Niveau de bruit de fond (ou souffle).

C'est la valeur efficace du bruit produit par une résistance sous la tension nominale de service en courant continu.

D) Identification.

1° Le type.

Il correspond à la nature du matériau résistant.

2° Le modèle.

Il est caractérisé par la forme générale extérieure, les dimensions et la nature des sorties.

3° La catégorie. — Elle est définie par les essais climatiques et mécaniques. Les résistances bobinées sont identifiées par la caractéristique de température maximale admissible (voir page 81).

4° La classe.

Elle est définie d'après la valeur du coefficient de température ou de la résistance isolée.

Exemple. — Il existe trois classes pour les résistances fixes bobinées de précision en fonction du coefficient de température.

5° La résistance nominale R_n.

Les valeurs normales sont celles des multiples ou sous-multiples des séries du tableau 6-1.

TABLEAU 6-1

± 20 %	10				15				22				33				47				68					
± 10 %	10		12		15		18		22		27		33		39		47		56		68		82			
± 5 %	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91		

6° La tolérance sur R_n.

Les tolérances normales sont ± 20 % ± 10 % ± 5 %.

Pour les résistances de précision, les tolérances peuvent avoir les valeurs suivantes :

± 2 % ± 1 % ± 0,5 % ± 0,25 % ± 0,1 %.

7° La puissance nominale P_n.

Elle est prise parmi les valeurs suivantes en watts :

1/8 — 1/4 — 1/2 — 1 — 2 — 4 — 8 — 16 .....

8° La tension limite nominale U_n.

Au-dessous d'une certaine valeur de résistance dite résistance critique l'emploi est limité par la puissance maximale et au-dessus de cette valeur par la tension nominale.

En pratique on peut admettre une résistance critique de 250 k Ω.

Pour les modèles courants les valeurs des tensions limites nominales sont : 250 — 350 — 500 — 750 V.

II. RÉSISTANCES MÉTALLIQUES.

A) Résistances bobinées de puissance.

1° Matériaux. — Quelques-uns des plus courants sont donnés dans le tableau 6-2.

TABLEAU 6-2

	Symbolisation	ρ ($\mu\Omega$ cm)	α par (°C)	t_{max} (°C) en service
Nichrome V.	N-C20M1	108	130×10^{-6}	1 100
Tophet A ...	N-C20	108	140×10^{-6}	1 150
Chromel A .	N-C20	108	110×10^{-6}	1 100

Les alliages de nickel chrome utilisés pour la fabrication des résistances de puissance sont caractérisés par une résistivité importante et une température maximale de service élevée.

2° Fabrication. — Elles sont constituées par un fil ou un ruban enroulé sur un support en stéatite ou en alumine (1). Le support peut être lisse ou nervuré en hélice pour maintenir le fil.

Les dilatations du support et du revêtement doivent être adaptées pour éviter « l'écaillage » ou « le tressaillage » du revêtement suivant que la dilatabilité du support est plus grande ou plus petite que celle du revêtement.

Le support ne doit pas être poreux afin de ne pas absorber l'humidité. Pour supprimer la porosité, il est vitrifié au four à haute température.

3° Protection. — Dans l'ordre de protection croissante nous trouvons :

a) « Les résistances non protégées », qui ne peuvent être utilisées que pour du matériel amateur non soumis à l'humidité.

b) « Les résistances émaillées ou laquées » protégées par un vernis cuit au four à 200 °C ou par une couche de peinture. Elles résistent bien à l'humidité mais mal au climat tropical. La température superficielle doit être inférieure à 125 °C.

(1) L'alumine frittée a une conductibilité thermique 20 fois plus grande que celle de la stéatite.

c) « Les résistances cimentées ».

Elles sont protégées par un ciment imperméable qui leur permet une dissipation de chaleur plus importante. La température maximale est de 260 °C.

d) « Les résistances vitrifiées ». L'émail est ici vitrifié au four vers 1 000 °C. Elles sont tropicalisées et peuvent admettre des températures de l'ordre de 400 °C.

4° Différents modèles.

a) Résistances non protégées.

Le fil est enroulé dans une gorge hélicoïdale du support.

Les sorties se font par colliers droits ou par colliers formant support (fig. 6-2).

Fig. 6-2

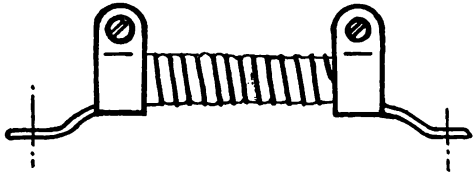
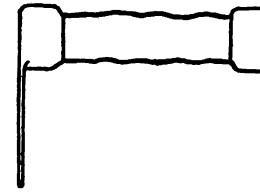


Fig. 6-3



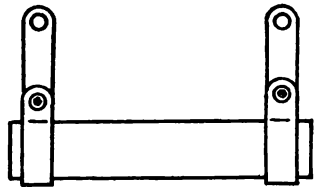


Fig. 6-4

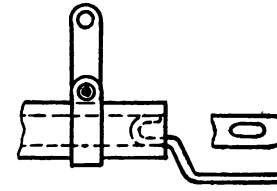


Fig. 6-5

Résistances non protégées et émaillées

b) Résistances émaillées ou cimentées.

Les sorties se font par embouts à fils radiaux ou par colliers droits (fig. 6-3 et 6-4). Certains modèles peuvent recevoir des supports s'enfonçant à l'intérieur du tube (fig. 6-5).

c) Résistances vitrifiées.

1. Sorties par colliers noyés. — Les colliers sont constitués par un métal ayant même coefficient de dilatation que l'émail et soudés électriquement à la cosse de sortie étamée (fig. 6-6). Modèle plat (fig. 6-7).

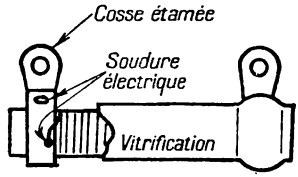


Fig. 6-6

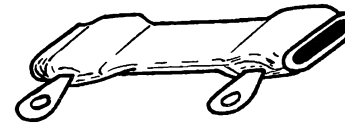


Fig. 6-7

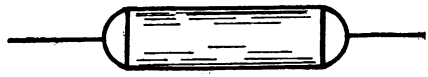


Fig. 6-8

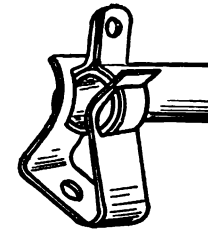


Fig. 6-9

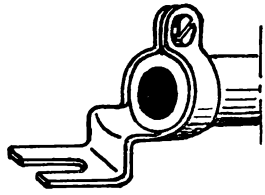


Fig. 6-10

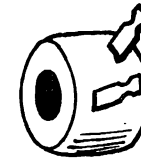


Fig. 6-11

Résistances vitrifiées

2. Sorties par fils axiaux (fig. 6-8). — Elles peuvent être protégées en plus par un manchon isolant.

3. Sorties par bagues nickelées, qui permettent leur montage dans des pinces assurant le contact électrique (fig. 6-9).

4. Sorties par pattes assurant la connexion (fig. 6-10).

5. Sorties par pattes soudables sur modèles à barillets empilables (fig. 6-11).

6. Diviseurs de tension avec colliers intermédiaires (fig. 6-12).

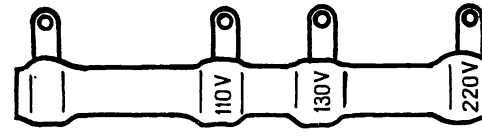


Fig. 6-12
Diviseur de tension

d) RÉSISTANCES SEMI-VITRIFIÉES (fig. 6-13).

Ce sont des résistances de faibles valeurs constituées par un ruban plat ou ondulé enroulé en hélice sur le support. La vitrification maintient le ruban

mais ne le recouvre pas complètement. Les sorties se font par collier droit ou collier support.

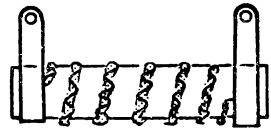


Fig. 6-13
Résistance semi-vitrifiée

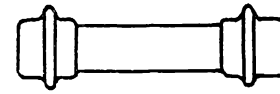


Fig. 6-14
Résistance sous verre

e) RÉSISTANCES SOUS VERRE OU PORCELAINE.

Les sorties se font par des bagues en cuivre étamé. Elles sont fixées au châssis par des pinces spéciales (fig. 6-14).

Remarques. — Les résistances fixes bobinées dans les matériels récepteurs de radiocommunications dit « Grand Public » et spécifiées dans la norme UTE C 93-211 sont désignées RL45 et RL25 pour les sorties par fils radiaux et RL100, RL80, RL50, RL35 pour les sorties par colliers. Les nombres indiquent la longueur.

5° Limites d'emploi.

— R_n : de 1 Ω à 180 kΩ suivant les modèles.

Ce sont les résistances vitrifiées qui offrent la gamme de valeurs la plus étendue. Les autres modèles sont limités à quelques kilohms.

— *Tol. :* ± 5 et ± 10 %.

— P_n : de 1 W à 500 W.

— U_n ; la limitation de tension dépend de la longueur du corps :
- 7 V/mm pour les résistances nues ou peintes.
- 12 V/mm pour les résistances vitrifiées.

— *Température maximale :*

Les résistances bobinées peuvent être divisées en trois catégories.

Caractéristique	A :	Température max. admissible	260 °C
»	B :	»	175 °C
»	C :	»	125 °C

Le graphique de la figure 6-15 montre les limites d'utilisation pour chaque catégorie en fonction de la température ambiante. On voit que pour une température ambiante de 80 °C on ne peut plus utiliser une résistance de caractéristique C qu'à 40 % de sa P_n.

— *Température minimale :* — 55 °C pour le matériel professionnel.

— *Tension de bruit :* négligeable.

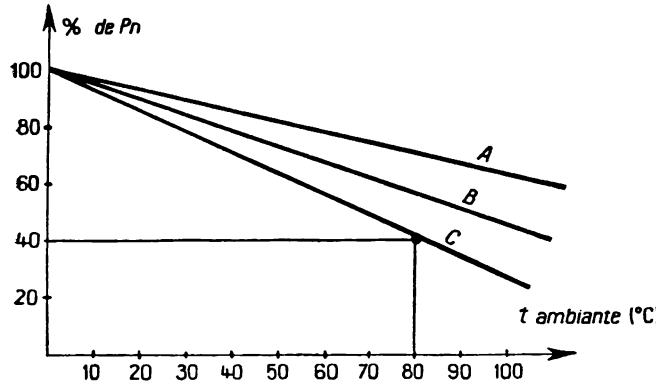


Fig. 6-15
Graphique d'utilisation des résistances bobinées de puissance

— *Limite de fréquence :* aucune loi générale ne peut être donnée concernant leur comportement en fréquence. Néanmoins on doit les proscrire en haute fréquence à cause de leur auto-inductance élevée.

— *Fiabilité :* pour être certain de leur fiabilité il ne faut pas les utiliser à plus de 50 % de leur puissance nominale dans les conditions les plus dures et le fil utilisé doit avoir un diamètre supérieur à 45 μ.

— *Recommandations d'emploi.*

La distance minimale entre les axes de résistances voisines doit être égale au moins à 4 fois le diamètre du corps.

Il est recommandé d'utiliser pour les résistances bobinées de puissance des soudures à haut point de fusion.

La dilatation des résistances de puissance étant appréciable, la fixation ne doit pas être trop rigide.

Ces résistances sont généralement utilisées dans les circuits d'alimentation en courant continu ou en basse fréquence.

B) Résistances bobinées de précision.

1° Matériaux.

Quelques-uns des plus courants sont donnés dans le tableau 6-3.

TABLEAU 6-3

	Symbolisation	ρ ($\mu\Omega$ cm)	α (par °C)	t_{max} (°C)
Cupron	U-N45	49	$+ 20 \times 10^{-6}$	500
Constantan .	U-N40	42	$+ 10 \times 10^{-6}$	535
Manganin...	U-M12N4	48,2	$+ 15 \times 10^{-6}$	100

Les cupro-nickels utilisés pour la fabrication des résistances de précision sont caractérisés par une résistivité assez grande, mais surtout par une stabilité remarquable en fonction de la température.

Pour les résistances de précision de valeurs élevées on utilise des alliages nickel-chrome.

2° Fabrication.

Le fil est enroulé en sens inverse dans chacune des gorges pratiquées dans un support en Araldite.

3° Protection.

Elle est assurée par un surmoulage en Araldite après imprégnation du bobinage pour éviter la pénétration de l'humidité.

Le bobinage peut aussi être placé dans un tube de verre ou de céramique qui est scellé hermétiquement.

4° Différents modèles.

— Résistance enroulée sur bâtonnet en verre enrobée de Bakélite avec sorties par fils axiaux (fig. 6-16).

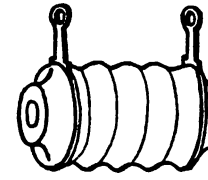
— Résistance sous moulage plastique avec sorties par cosses radiales (fig. 6-17).

— Modèle plaquette avec sorties par fils radiaux (fig. 6-18).

— L'auto-induction est négligeable en BF et la capacité répartie est faible.

Fig. 6-16

Fig. 6-17



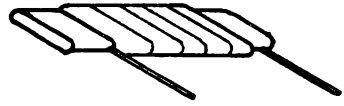


Fig. 6-18

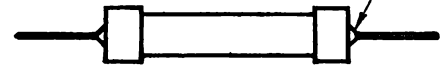


Fig. 6-19

Résistances bobinées de précision

— Résistances tropicalisées sous tube d'aluminium ou sous revêtement silicone à sorties axiales (fig. 6-19).

— Résistances non inductives :

Pour réaliser les résistances non inductives qui doivent être préférées en HF on utilise soit le bobinage aller-retour Ayrton-Perry (fig. 6-20) ; soit le

bobinage comportant deux enroulements en sens inverse (fig. 5-21); soit un bobinage fractionné avec un sens d'enroulement inversé dans chaque section. La figure 6-22 représente un modèle à sorties par cosses radiales et la figure 6-23 un modèle à fixation par tige centrale.

Fig. 6-20

Fig. 6-21

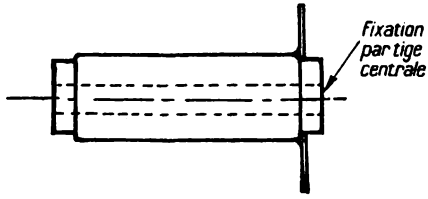


Fig. 6-23

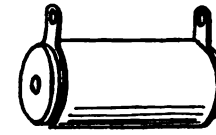


Fig. 6-22

Résistances non inductives

5° Limites d'emploi.

— R_n : de 0,1 Ω à 1 M Ω.
— *Tol.* : ± 1 % ± 0,5 % ± 0,25 % ± 0,1 %.
— P_n : de 1/8 W à 8 W.
— U_{max} : de 15 V à 2 000 V suivant les valeurs de R_n.
— *Température maximale* : 105 °C.

Le graphique de la figure 6-24 indique les limites d'utilisation des résistances bobinées de précision.

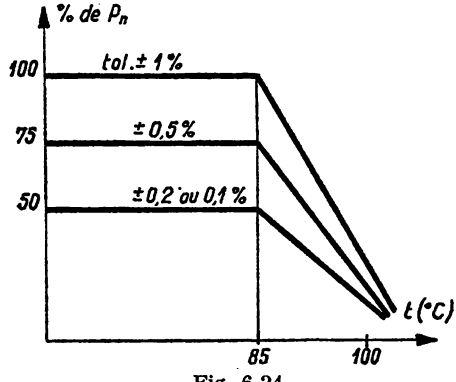


Fig. 6-24
Graphique d'utilisation des résistances bobinées de précision

— *Tension de bruit* : négligeable.

— *Limite de fréquence* : aucune loi générale ne peut être donnée mais la valeur de la capacité parallèle est faible (environ 1 pF). Par ailleurs l'inductance des résistances non inductives est inférieure à 1 μH alors qu'elle atteint plusieurs centaines de μH pour les résistances bobinées normalement.

— *Fiabilité* : pour avoir une bonne fiabilité il est recommandé de ne pas dépasser 50 % P_n, d'éviter absolument les surcharges de tension et de puissance même momentanées.

C) Résistances à film métallique.

1° Matériau.

Les métaux ou alliages métalliques sont déposés sur un support en céramique ou en pyrex par évaporation cathodique sous vide. Leur coefficient de température est compris entre 20 et 200 $\times$ 10^{-6} par °C. On utilise :

— des métaux précieux (Au, Pt, Pd, Rh, Ir),
— des métaux réfractaires (Mo, W, Ta, Nb),
— des métaux inoxydables (Cr, Ti, Ni).

2° Fabrication.

Les deux extrémités du tube ou de la lame en quartz, pyrex ou céramique sont enduites de platine ou d'argent pour assurer ultérieurement un bon contact des sorties. Le métal est ensuite déposé par évaporation thermique sous vide en un film dont l'épaisseur fonction de la valeur de la résistance à obtenir est inférieure à 0,1 μ. Pour les valeurs supérieures, on trace un sillon hélicoïdal dans la couche. Un autre procédé consiste à déposer un film photogravé selon la technique des circuits imprimés.

3° Protection.

Ces résistances sont protégées par un moulage en Bakélite ou en résine époxy. Les résistances de précision sont enfermées dans un boîtier en céramique scellé hermétiquement. La protection est complétée par un vernis au silicone. Certains modèles sont sous tube de verre.

4° Différents modèles.

— Résistances cylindriques avec sorties par fils axiaux (fig. 6-25).
— Résistances plates avec sorties par lamelles.

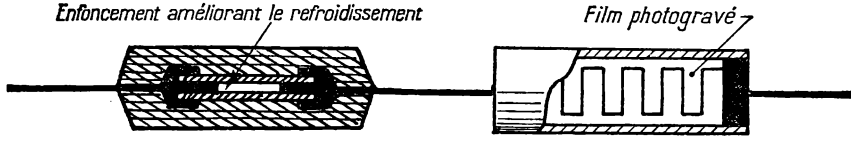


Fig. 6-25
Résistances à film métallique

5° Limites d'emploi.

— R_n : de 1 Ω à 5 M Ω.
— *Tol.* : ± 5 % ± 2 % ± 1 % ± 0,5 %.
— P_n : 1/16 W à 2 W.
— U_{max} : de 150 V à 1/16 W à 1 k V à 2 W.
— *Tension de bruit :* elle inférieure à 0,02 μ V/V entre 0 et 10 kHz à puissance maximale.
— *Plage de température :* — 55 à + 155 °C.

La puissance nominale peut être utilisée jusqu'à 70 °C.

— *Stabilité dans le temps :* elle est remarquable à cause de l'homogénéité de la couche métallique. La variation Δ R/R est inférieure à 0,5 % aux essais de vieillissement. Elles sont très stables à chaud.

— *Limite de fréquence :* la variation de résistance entre 0 et 100 MHz est inférieure à 10 %.

6° Enduits résistants.

Ce sont des produits à base de verre fritté et de poudres métalliques pouvant être appliqués sur des diélectriques céramiques par des procédés classiques : immersion, brosse, pinceau. Un passage au four en atmosphère ordinaire, permet d'obtenir un revêtement solide.

Aucune forme du support n'étant imposée ces enduits sont faciles à mettre en œuvre dans les circuits miniatures.

Propriétés : Bonne résistance à l'abrasion et au choc. Excellente stabilité.

Résistances par unité de section de passage : 500, 3 500 ou 10 000 Ω pour une couche de 25,4 μ d'épaisseur. Des valeurs intermédiaires peuvent être obtenues par mélange des 3 produits.

III. RÉSISTANCES AU CARBONE.

A) Résistances agglomérées.

1° Matériaux.

— Carbone colloïdal : ρ = 4 000 à 6 000 $\mu\Omega$ cm (noir de fumée).
— Graphite : ρ = 1 000 $\mu\Omega$ cm.

2° Fabrication.

Le carbone finement broyé est mélangé en proportions convenables avec une matière neutre (argile, silice) et un liant (résine formophénolique). La valeur de la résistance pour une dimension donnée dépend du pourcentage de carbone. Le moulage se fait à chaud sous forte pression. L'étalonnage de la résistance se fait en meulant le corps.

3° Protection.

Les résistances ordinaires sont seulement revêtues d'une peinture ou d'un vernis.

Dans les montages très serrés on utilise des résistances isolées qui sont protégées par un tube de céramique scellé par un ciment ou bien par un moulage en Bakélite (surmoulage).

4° Différents modèles.

— Résistances non isolées à sorties par fils axiaux ancrés (fig. 6-26).
— Résistances non isolées à sorties par fils radiaux soudés sur étamage (fig. 6-27).

— Résistances isolées sous tube de céramique (fig. 6-28).
— Résistances isolées par surmoulage en Bakélite (fig. 6-29).
— Résistances isolées ultraminiatures (l = 6,5 mm, Φ = 2,3 mm).

Fig. 6-26

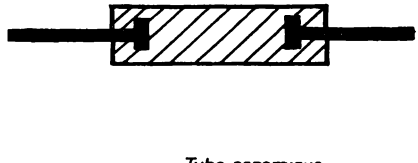
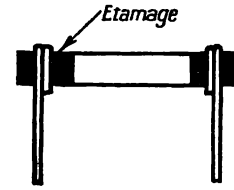


Fig. 6-27



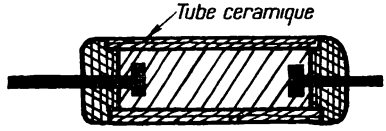


Fig. 6-28

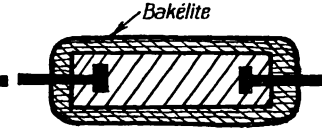


Fig. 6-29

Résistances agglomérées

5° Limites d'emploi.

— *Avantages :* Les avantages de ces résistances sont la robustesse mécanique et électrique, la possibilité de supporter de fortes surcharges, le faible encombrement et l'inexistence d'induction propre.

— *Inconvénients :* Par contre elles ont une tension de bruit de fond assez élevée. Leur valeur ohmique décroît lorsque la fréquence augmente et lorsque la tension augmente.

Il ne faut pas les employer dans les circuits ne pouvant admettre une dérive de ± 10 %, ni dans les circuits à haute impédance et faible niveau.

— R_n : de 10 Ω à 22 M Ω.
— *Tol.* : ± 20 % ± 10 % ± 5 %.
— P_n : de 1/4 W à 4 W.

P_n	1/4 W	1/2 W	1 W	2 W	4 W
Longueur		10	14	17,5	
Diamètre		4	5,8	8	

— U_{max} : 250 V pour 1/4 W. 350 V pour 1/2 W et 500 V pour les puissances supérieures.
— *Coefficient de tension :* il est négatif et inférieur à 350×10^{-6}/V pour $P_n \leqslant 0{,}5$ W, inférieur à 200×10^{-6}/V pour $P_n > 0{,}5$ W.

— *Coefficient de température :* il est légèrement négatif et négligeable. Il est plus important pour $R_n > 10$ kΩ.

— *Plage de température :* — 55 °C à + 105 °C.

Au-delà de 70 °C la puissance dissipable décroît.

— *Tension de bruit :* elle est élevée et varie de 2 μV/V pour les faibles valeurs ohmiques à 6 μV/V pour les fortes valeurs.

— *Caractéristique de fréquence.*

La valeur ohmique décroît lorsque la fréquence augmente. Cette diminution est provoquée par la capacité shunt (0,2 à 1 pF) due aux contacts irréguliers existant entre les fines particules de carbone. Par exemple une résistance 1/2 W de 100 kΩ en courant continu ne fait plus que 50 kΩ à 40 MHz.

— *Fiabilité :* Une résistance agglomérée bien utilisée est fiable mais le vieillissement se traduit par une augmentation de résistance pouvant atteindre 100 % pour les valeurs élevées.

B) Résistances à couche.

1° Matériau.

— Carbone pyrolytique.
Résistivité : $\rho \approx 3\,000$ μΩ cm.
Coefficient de température $\alpha \approx -500 \times 10^{-6}$ par °C.

2° Fabrication.

Les bâtonnets ou tubes en porcelaine sont placés dans un four électrique en atmosphère inerte. On introduit à une température de l'ordre de 1 000 °C des vapeurs d'hydrocarbures (benzine, méthane) qui se décomposent (cracking) et donnent du carbone pyrolitique qui se dépose en couche fine sur les supports. La valeur de la résistance est d'autant plus grande que l'épaisseur de la couche est plus faible.

3° Protection.

Elle est assurée par une couche de peinture ou de vernis cuite au four.
Les résistances à couche isolée sont enrobées dans de la Bakélite.
Les résistances tropicalisées sont protégées par un produit comportant un fongicide et étudié pour éviter la migration du carbone dans la protection.

4° Différents modèles.

a) Résistances a couche extérieure.

● Modèles à couche continue. Les embouts sont fixés sur une métallisation argent pous assurer un bon contact. Le réglage de la valeur se fait par flash électronique produisant un dégagement de chaleur d'où évaporation du carbone augmentant la résistance.

Sorties par fils axiaux (fig. 6-30).
Sorties par pattes radiales (fig. 6-31).

● Modèles à couche hélicoïdale.

Pour obtenir des fortes valeurs ohmiques la couche doit être très faible et régulière donc difficile à obtenir. On peut arriver au même résultat avec une couche plus épaisse creusée d'un sillon hélicoïdal (à la meule) qui augmente ainsi la longueur de la résistance (fig. 6-32).

b) RÉSISTANCES A COUCHE INTÉRIEURE.

La couche de carbone est déposée à l'intérieur d'un tube de 0,8 mm de diamètre intérieur. Le tube en verre ou en quartz a quelques dixièmes de mm d'épaisseur. Les fils de sortie sont montés à force à l'intérieur du tube (fig. 6-33) et maintenus en place par le moulage Bakélite.

Fig. 6-30

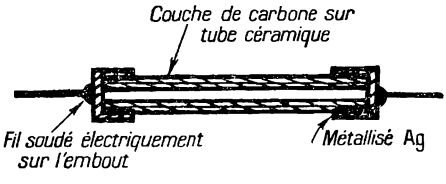


Fig. 6-31

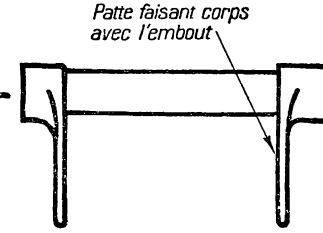
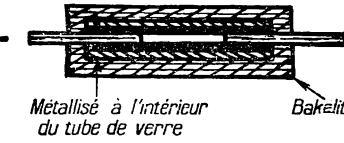


Fig. 6-32

Fig. 6-33



Résistances à couche

5° Limites d'emploi.

— *Avantages :* Le bruit de fond est faible. La capacité résiduelle est négligeable. La valeur ohmique est pratiquement indépendante de la tension et de la fréquence.

— *Inconvénients :* La couche est fragile et supporte mal les surcharges. Leur prix est élevé.

— R_n : de 10 Ω à 100 M Ω.

— *Tol. :* ± 10 % ± 5 % pour les résistances ordinaires.
± 2 % ± 1 % ± 0,5 % pour celles à haute stabilité.

— P_n : 1/8 W à 2 W.

— U_{max} : de 150 V à 1 k V suivant les puissances.

— *Cœfficient de tension ;* il est faible $< -20 \times 10^{-6}$/V.

— *Plage de température :* — 55 à + 125 °C.

Au-delà de 40 °C la puissance dissipable diminue pour atteindre 0 % de P_n à la température maximale.

— *Cœfficient de température :* de — 200 × 10^{-6} par °C pour les faibles valeurs ohmiques à — 1 000 × 10^{-6} par °C pour les fortes valeurs.

— *Tension de bruit :* elle est faible et environ de 0,04 μV/V.

— *Caractéristique de fréquence :* la capacité shunt étant inférieure à 0,1 pF la variation est faible. Certaines fabrications sont utilisables jusqu'à 100 MHz avec une baisse de valeur ohmique inférieure à 5 %.

IV. RÉSISTANCES A COUCHE D'OXYDES.

1° Matériau.

Couche d'oxyde d'étain (93 %) et d'oxyde d'antimoine (7 %) d'épaisseur 0,01 à 0,5 μ.

2° Fabrication.

Un mélange de chlorure d'étain et de trichlorure d'antimoine est déposé sur une surface de verre, de quartz ou de porcelaine. Un chauffage au rouge produit une hydrolyse avec formation d'oxyde. La couche obtenue est dure, adhérente et très difficilement attaquable chimiquement.

Les extrémités sont argentées pour soudage des connexions et la protection est assurée par une résine de silicone.

3° Limites d'emploi.

— R_n : de 10 Ω à 4,3 M Ω.
— *Tol.* : ± 5 % ± 2 % ± 1 %.
— P_n : 1/8 W à 4 W.
— U_{max} : 250 — 350 — 500 — 750 V.
— *Cœfficient de tension :* 1 × 10^{-5} par V.
— *Stabilité :* dérive inférieure à 1 %.
— *Température maximale :* + 200 °C.
— *Cœfficient de température :* ± 300 × 10^{-6} par °C.

Pour les valeurs supérieures à 10 k Ω et au-dessus de 20 °C il est faible et égal à ± 50 × 10^{-6} par °C.

— *Caractéristique de fréquence :* approximativement celle des résistances à couche de carbone.

— *Fiabilité :* elle est excellente.

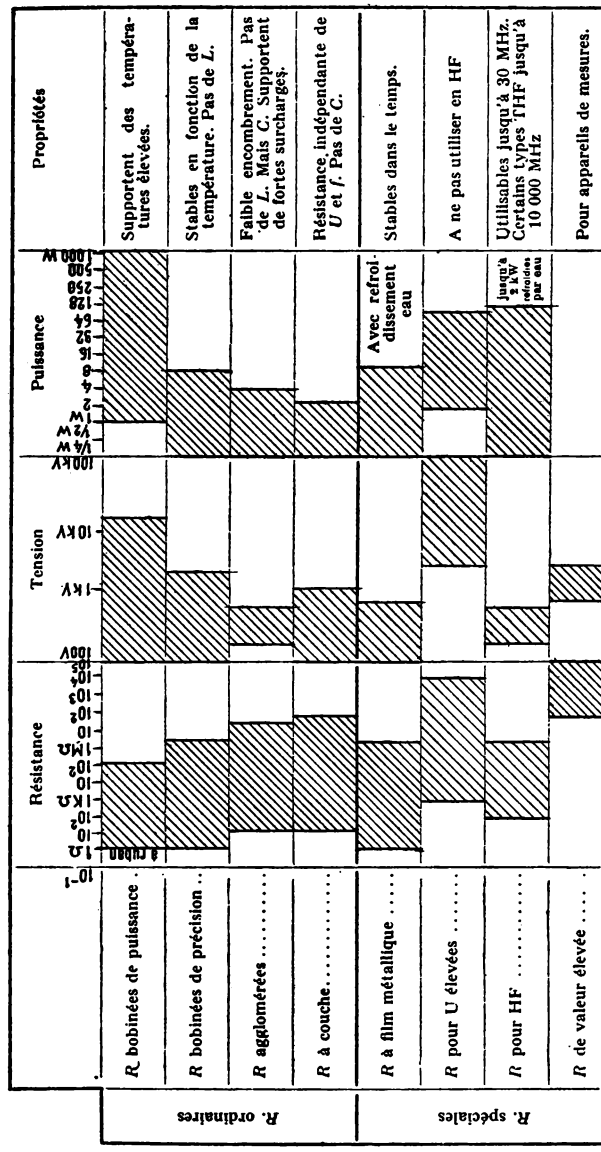
V. MARQUAGE.

A) Résistances bobinées.

Le marquage se fait en clair et doit comporter les indications suivantes :

— La résistance nominale ;
— La tolérance sur cette valeur ;
— La dissipation nominale pour les résistances à forte dissipation.

TABLEAU 6-4


R. ordinaires
R. spéciales
Résistance
Tension
Puissance
Propriétés
R bobinées de puissance
R bobinées de précision
R agglomérées
R à couche
R à film métallique
R pour U élevées
R pour HF
R de valeur élevée
Supportent des températures élevées.
Stables en fonction de la température. Pas de L.
Faible encombrement. Pas de L. Mais C. Supportent de fortes surcharges.
Résistance indépendante de U et f. Pas de C.
Stables dans le temps.
A ne pas utiliser en HF
Utilisables jusqu'à 30 MHz. Certains types THF jusqu'à 10 000 MHz
Pour appareils de mesures.
Avec refroidissement eau
jusqu'à 2 kW avec refroidissement par eau

Nota. — Les limites données sont des maximums et il y a lieu de consulter les fabricants pour connaître les limites de leurs propres fabrications.

B) Résistances à couche à haute stabilité.

Le marquage se fait en clair comme ci-dessus.

C) Résistances au carbone agglomérées ou à couche.

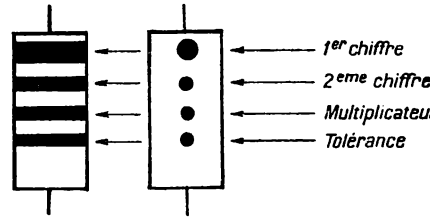


Fig. 6-34
Marquage des résistances au carbone

Le marquage se fait suivant le code des couleurs ci-dessous.

TABLEAU 6-5

	Noir	Brun	Rouge	Orange	Jaune	Vert	Bleu	Violet	Gris	Blanc	Or	Argent
1er et 2e chiffre	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Multiplicateur	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6					
Tolérance		±1%	±2%								±5%	±10%

VI. ESSAIS.

A) Généralités.

Les essais de type statistique sont réalisés sur un certain nombre d'échantillons prélevés dans la production normale du fabricant. Le nombre d'échantillons dépend du type de résistance et du groupe d'essais réalisés.

Suivant que les essais sont réalisés par le fabricant ou par l'utilisateur ils se classent en :

1° Essais de qualification. — Destinés à mesurer ou vérifier l'ensemble des caractéristiques d'un type de résistance.

2° Essais de réception. — Destinés au contrôle des résistances faisant partie d'une commande.

B) Classification.

1° Examens visuels.

— Dimensions.
— Aspect.
— Marquage.

2° Essais électriques.

— Résistance.
— Coefficient de température.
— Coefficient de tension.
— Caractéristique résistance température.
— Résistance d'isolement et rigidité diélectrique (pour résistances isolées).
— Dissipation nominale.
— Surcharge momentanée.
— Tenue à haute température.
— Endurance.

3° Essais climatiques.

— Stockage à basse température.
— Variations rapides de température.
— Basse pression atmosphérique.
— Essai cyclique combiné.
— Chaleur sèche.
— Brouillard salin.
— Immersion.

4° Essais mécaniques.

— Chocs répétés.
— Soudure.
— Robustesse des sorties.
— Flexion du corps.

Nota. — Le nombre et le type d'essais subis sont variables suivant les types de résistances (consulter les normes).

Tous les essais pour lesquels il n'est pas imposé de conditions de température sont effectués à 20 ± 5 °C avec une humidité relative ambiante inférieure à 80 % et une pression atmosphérique comprise entre 700 et 800 mm de mercure.

VII. NORMES.

UTE C 93-210 : Résistances fixes bobinées. Règles (1959).
UTE C 93-211 : Résistances fixes bobinées. Spécifications (1959).
CCT 04-01 : Résistances agglomérées au carbone (1958).
CCT 04-02 : Résistances bobinées à forte dissipation (1961).
CCT 04-03 : Résistances à couche à haute stabilité (1961).
CCT 04-04 : Résistances à couche d'usage courant (1961).
CCT 04-05 : Résistances bobinées de précision (1958).

CCT 04-06 : Résistances fixes à couche à forte dissipation (1961).
CCT 330 : Epreuves et essais des résistances (1950).
FNIE 016 : Résistances fixes agglomérées au carbone, isolées (1961).
FNIE 017 : Résistances fixes à couche de carbone pyrolitique (1961).
FNIE 022-1 : Résistances fixes non bobinées. Comportement aux fréquences radioélectriques (1962).
FNIE 022-2 : Résistances fixes non bobinées. Comportement en régime d'impulsions (1962).

CHAPITRE 7

LES RÉSISTANCES RÉGLABLES

I. GÉNÉRALITÉS.

A) Définitions.

1° Résistance réglagle. — C'est une résistance dont la valeur peut être modifiée (rhéostat, potentiomètre, etc...).

2° Rhéostat. — C'est une résistance dont la valeur peut être réglée par curseur (réglage continu) ou par commutateur à plots (réglage discontinu) sans interruption de service.

3° Résistance ajustable. — C'est une résistance réglée une fois pour toute lors de l'étalonnage de l'appareil.

4° Diviseur de tension. — C'est une résistance fixe sur laquelle on a effectué une ou plusieurs prises intermédiaires permettant de prélever des fractions déterminées de la tension totale.

5° Potentiomètre. — C'est un diviseur de tension dont la prise intermédiaire peut être réglée de façon continue sans interruption de service. Un potentiomètre peut être monté en rhéostat.

6° Potentiomètre ajustable. — C'est un potentiomètre dont la prise intermédiaire est réglée une fois pour toute lors de l'étalonnage de l'appareil.

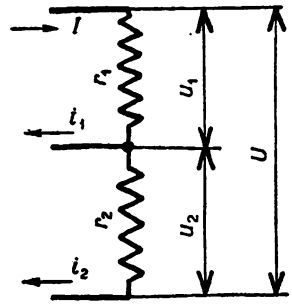


Fig. 7-1

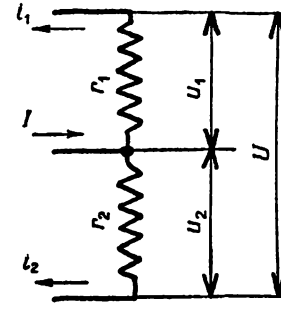


Fig. 7-2

B) Calcul d'un diviseur de tension à une prise intermédiaire (fig. 7-1 et 7-2).

Dans les deux cas, on a :

$$R = r_1 + r_2 \qquad I = i_1 + i_2.$$

L'application de la loi d'Ohm à la figure 7-1 donne :

$$U = r_1 I + r_2 i_2$$

et, pour la figure 7-2 : $|U| = r_1 i_1 - r_2 i_2$

C) Axes de commande (d'après norme F.N.I.E. 008).

Φ (mm)	Couple max (N ∧ m)	Applications
10	2	Pour axes concentriques
8	2	Axes normaux
6	1	
4	0,7	Axes miniatures
3	0,5	

D) Terminologie.

1° **Résistance nominale** : R_n. — Valeur indiquée sur la résistance réglable.

2° **Résistance résiduelle de fin de course** : r_f (fig. 7-3). Elle doit être inférieure à un certain pourcentage de la résistance totale.

3° **Résistance résiduelle de début de course** : r_d (fig. 7-3).

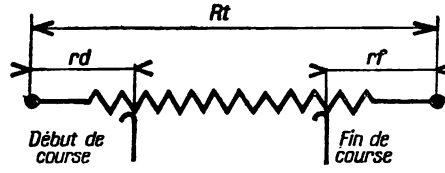


Fig. 7-3

4° **Résistance totale** : R_t. — C'est la résistance nominale plus la tolérance effective :

$$R_t = R_n + r_f + r_d$$

5° Température nominale de service. — Température ambiante à laquelle est définie la dissipation nominale.

6° Dissipation nominale : P_n. — C'est la puissance dissipée sur la totalité de l'élément en service continu, à la température nominale de service.

7° Tension maximale de service : U_m. — C'est la valeur maximale de la tension continue qui peut être appliquée à la résistance réglable entre les bornes extrêmes en service continu, dans une atmosphère calme, à la température nominale de service.

Pour les faibles valeurs elle se déduit de P_n et de R_n ($U_m = \sqrt{P_n R_n}$) et pour les fortes valeurs elle est éventuellement limitée à la tension limite nominale.

8° Intensité maximale de service (I_m). — Valeur maximale de l'intensité continue ou alternative efficace qui peut traverser un potentiomètre entre les bornes extrêmes en atmosphère calme, à la température de service.

9° Tension maximale par rapport à la masse U_0. — C'est la tension maximale continue ou de crête alternative sinusoïdale qui peut être appliquée en service entre l'une quelconque des 3 sorties et la masse.

10° Température maximale de service. — C'est la température ambiante maximale à laquelle peut être utilisée la résistance réglable. A cette température elle ne peut plus dissiper de puissance.

11° Course du curseur. — Pour un potentiomètre, c'est l'angle en degrés dont il faut faire tourner l'axe pour amener le curseur d'une butée à l'autre.

12° Manœuvre. — Une manœuvre correspond à un balayage entier de la piste aller et retour en partant d'une butée.

E) Identification.

1° Le type. — Il correspond à la nature du matériau résistant.

2° Le modèle. — Il est caractérisé par la forme générale extérieure et les dimensions.

3° La catégorie. — Elle est définie par la sévérité des essais climatiques.

4° La résistance nominale. — Les résistances nominales des résistances ajustables sont celles utilisées pour les résistances fixes.

Les résistances nominales des potentiomètres sont choisies parmi les multiples décimaux des termes préférentiels suivants :

$$1 — 2{,}5 — 5.$$

5° Tolérance sur la résistance nominale.

$$\pm 20\ \% \pm 10\ \% \pm 5\ \%.$$

6° Lois de variations (voir paragraphe VII) : pour les potentiomètres seulement.

7° La puissance nominale P_n.

II. RÉSISTANCES AJUSTABLES.

A) Généralités.

Les résistances ajustables sont généralement des résistances bobinées à prise intermédiaire. Le matériau, la fabrication, les limites d'emploi ayant été étudiés dans le chapitre des résistances fixes, nous n'examinerons ici que les différents types.

Les résistances vitrifiées (ou non) sont constituées par un fil à spires jointives qui est dénudé sur toute la longueur de façon à ménager une fenêtre rectangulaire qui permet le contact de la prise intermédiaire sur le fil résistant.

Ces résistances ne peuvent plus être tropicalisées puisqu'une partie du fil est en contact avec l'air.

B) Différents modèles.

1° Résistances bobinées ajustables à collier intermédiaire. — La pression de contact de la prise intermédiaire peut être obtenue par déformation élastique du collier, par patin rivé au collier ou par patin réglé par vis (fig. 7-4).

2° Résistances bobinées ajustables par curseur. — Elles sont utilisées pour des réglages précis et stables ou dans des circuits nécessitant un étalonnage fréquent. Le curseur est déplacé au moyen d'un système vis écrou (fig. 7-5).

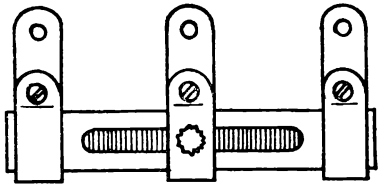


Fig. 7-4

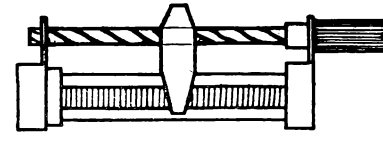


Fig. 7-5

Résistances ajustables

C) Applications.

Ces résistances ajustables sont surtout utilisées en radioélectricité pour régler la résistance d'un circuit de chauffage de tubes, pour ajuster un potentiel de grille ou encore pour le réglage du zéro sur certains appareils de mesures.

III. POTENTIOMÈTRES BOBINÉS.

A) Potentiomètres à faible dissipation.

1° Matériau.

On emploie des nichromes pour les valeurs élevées (au-dessus de 2 000 Ω) et des cupro-nickels pour les faibles valeurs. Ces derniers ont une résistivité plus faible et leur température de service est plus petite mais par contre ils sont stables avec la température ce qui les fait préférer pour les potentiomètres de précision. (Voir les caractéristiques chiffrées au chapitre des résistances).

2° Fabrication.

a) PLAQUETTE RÉSISTANTE.

Le fil résistant est enroulé à plat sur une plaquette en carton bakélisé. Cette plaquette est ensuite cintrée pour le montage dans le boîtier. Le fil est enroulé à spires jointives s'il est émaillé ou à spires espacées s'il est nu. Dans le cas de fil émaillé on le dénude sur la tranche pour permettre le contact du curseur. La plaquette est recouverte de vernis, sauf sur la tranche de contact, pour fixer le fil et empêcher son déplacement ultérieur.

Le fil est maintenu aux extrémités par des colliers en laiton argenté fixés sur les cosses de sortie en laiton argenté également.

Si la plaquette a une largeur constante on obtient un potentiomètre à variation linéaire. Pour obtenir un potentiomètre logarithmique on enroule le fil sur une plaquette de largeur variable. En plaçant en série 2 plaquettes ayant des fils résistants de nature différente, on peut obtenir une courbe logarithmique double qui permet d'obtenir toutes les valeurs comprises entre 100 Ω et 50 000 Ω pour un encombrement faible (fig. 7-6 et 7-7).

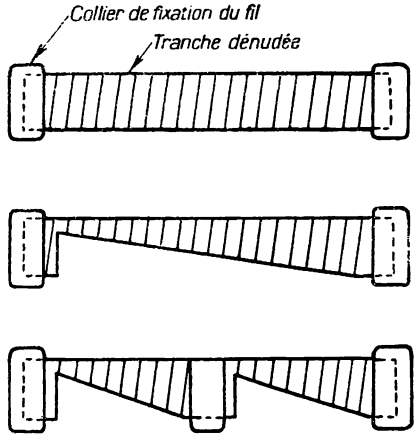


Fig. 7-6
Plaquettes résistantes

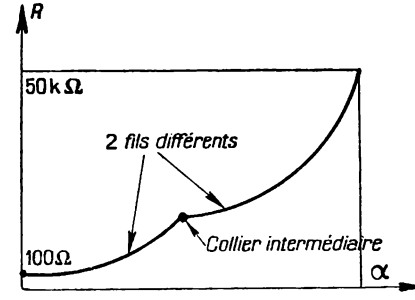


Fig. 7-7

b) AXE DE COMMANDE (fig. 7-8).

Cet axe en acier de diamètre 6 mm en général, comporte en bout une plaquette en Bakélite sur laquelle est fixée le curseur qui doit être isolé de l'axe puisque celui-ci est relié électriquement au châssis. L'axe est immobilisé en translation sur le canon par jonc ou rondelle (fig. 7-9 et fig. 7-10).

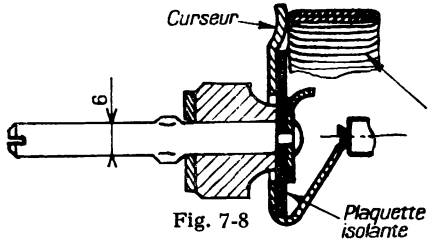


Fig. 7-8

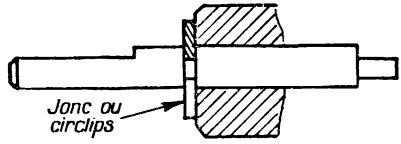


Fig. 7-9

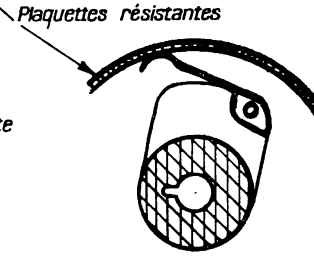


Fig. 7-10

Axes et curseurs de potentiomètres bobinés

c) CURSEUR.

Sa forme simple ou double doit être soigneusement étudiée pour que le contact soit toujours bon sans usure du fil. Le contact est réalisé par pression due à l'élasticité du maillechort utilisé. Il se fait généralement sur la tranche (fig. 7-8), plus rarement sur la surface latérale (fig. 7-10). La liaison électrique avec la cosse de sortie se fait par frotteur appuyant sur une piste circulaire en laiton argenté lubrifiée avec une graisse conductrice, pour éviter les crachements.

d) BOITIER (fig. 7-11).

Il est constitué par un socle en Bakélite qui enferme la plaquette résistante et au travers duquel passent les cosses de sortie. Le couvercle protecteur est en tôle d'acier emboutie, et peut contenir éventuellement un interrupteur. Les sorties passent à travers le fond ou à travers la surface latérale (fig. 7-12).

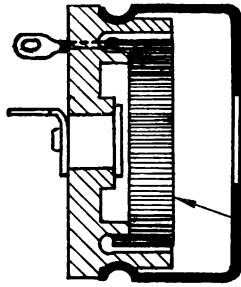


Fig. 7-11

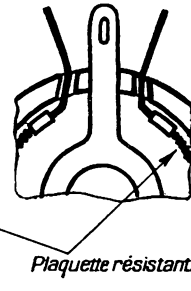


Fig. 7-12

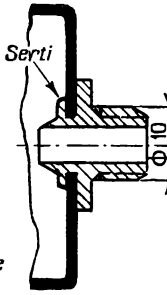


Fig. 7-13

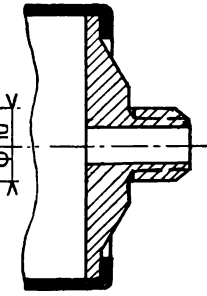


Fig. 7-14

Potentiomètres bobinés

e) CANON.

Il est décolleté en alliage d'aluminium serti sur le couvercle, ou moulé en zamak agrafé au couvercle (fig. 7-13 et 7-14).

Le diamètre fileté est de 10 mm et permet la fixation au châssis par rondelle frein et écrou. Certains modèles sont fixés par trous taraudés (fig. 7-18).

3° Protection.

Elle sera examinée plus loin pour l'ensemble des potentiomètres.

4° Différents modèles.

a) MODÈLES NORMAUX.

— sans interrupteur (fig. 7-15),

— avec interrupteur généralement rotatif (fig. 7-16), ou quelquefois à poussoir.

— sorties par cosses axiales (fig. 7-15),

— sorties par cosses radiales (fig 7-16).

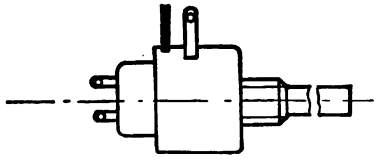


Fig. 7-16

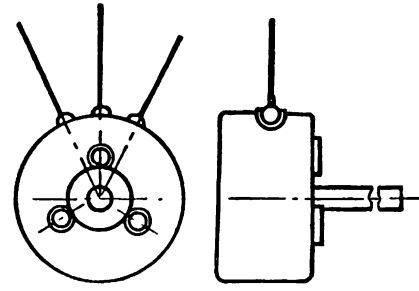


Fig. 7-18

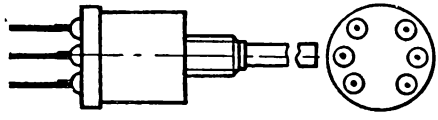


Fig. 7-15

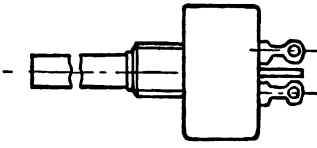


Fig. 7-19

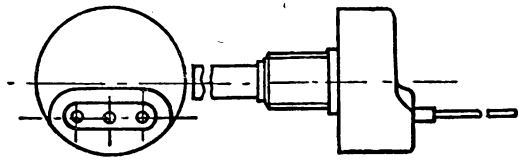


Fig. 7-17

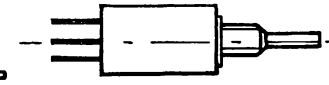


Fig. 7-20

Différents modèles de potentiomètres bobinés

b) Modèles tropicalisés.

— sorties par fils axiaux (fig. 7-17),
— sorties par fils radiaux (fig. 7-18).

c) Modèles miniatures.

Utilisés sur appareils à transistrons et sur circuits imprimés (fig. 7-20).

d) Modèles doubles.

— Commande par le même axe :

● En tandem, les deux potentiomètres fonctionnant simultanément.
● Commande séparée en poussant ou tirant l'axe.

5° Limites d'emploi.

— R_n : de 50 Ω à 50 k Ω.

— *Tol.* : ± 10 % ± 5 %.

— P_n : 1/2 W à 8 W.

— *Loi de variation :* la variation linéaire est respectée à ± 5 % en cinq points sur 80 % de la course.

— U_{max} : de 5 V à 500 V suivant puissance.

— *Plage de température :* — 55 °C à + 85 °C ou à + 100 °C + 125 °C suivant la *catégorie.* La puissance dissipable diminue au-dessus de 40 °C (70 °C ou 85 °C).

— *Résistances de début et de fin de course :* 0,3 à 1 Ω pour R_n inférieure à 2,5 kΩ et inférieure à 0,001 R_n pour les valeurs supérieures à 2,5 kΩ.

— *Bruit de fond :* négligeable.

— *Crachement en rotation :* inférieur à 180 μV/Vcc.

— *Caractéristique de fréquence :* le rapport R_{HF}/Rcc est supérieur à 1 pour $R_n < 2$ kΩ et inférieur à 1 pour $R_n > 2$ kΩ.

B) Potentiomètres à forte dissipation.

1° Matériau.

On utilise toujours des alliages de nickel chrome qui ont une résistivité importante et supportent des températures élevées.

2° Fabrication (fig. 7-21).

a) Support résistant.

Le fil de section importante généralement sous forme de ruban est enroulé sur un support en céramique ou en aluminium isolé du fil par des feuilles de mica.

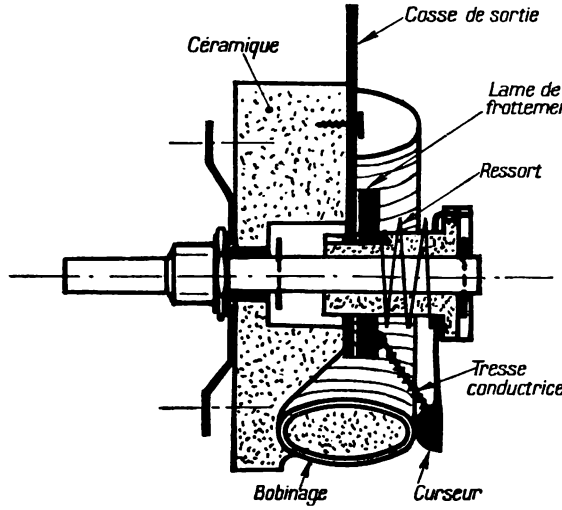


Fig. 7-21

Potentiomètre bobiné de puissance

Ces potentiomètres supportent des fortes intensités et la surface de contact du curseur doit être suffisante. Pour de fortes puissances certains constructeurs sondent électriquement un contact en cuivre sur le fil.

Certains potentiomètres possèdent un plot mort d'extrémité non connecté.

b) SOCLE.

L'anneau bobiné vitrifié est fixé ensuite sur le socle en céramique ou métallique. Dans ce dernier cas il est relié directement au châssis et la dissipation de chaleur peut être beaucoup plus importante. Dans le cas de support métallique tout défaut d'isolement du fil résistant est évité par l'interposition de lamelles de mica.

c) CURSEUR.

Il est en acier trempé et possède à son extrémité un contact en graphite ou en carbo-bronze. La conductibilité du curseur étant assez mauvaise le courant est dérivé par une tresse en cuivre.

Un ressort assure une pression suffisante du curseur sur la résistance et du frotteur sur la piste circulaire.

L'entraînement du curseur par l'axe se fait par une pièce en céramique.

Les cosses de sortie sont en cuivre argenté ou étamé.

d) CANON.

Il est identique à celui des modèles normaux. Des pattes de fixation supplémentaires sont prévues.

3° Différents modèles.

a) POTENTIOMÈTRES BOBINÉS VITRIFIÉS SIMPLES.

Il sont utilisés pour régler avec précision les tensions d'alimentation des appareils électroniques professionnels. Ils sont à variation linéaire.

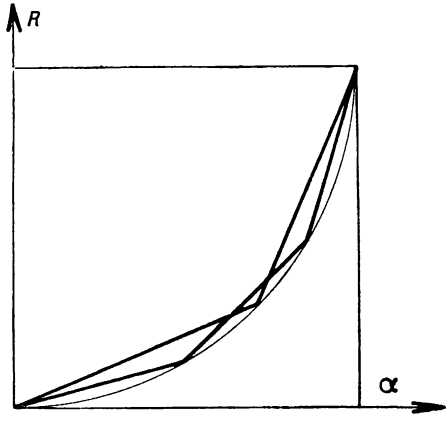


Fig. 7-22
Courbes de potentiomètres pseudo-logarithmiques

b) POTENTIOMÈTRES PSEUDO-LOGARITHMIQUES.

Ils sont constitués par plusieurs fils ou rubans de dimensions décroissantes raccordés par soudure électrique ou brasure bout à bout. Les courbes sont celles de la figure 7-22 suivant que le potentiomètre comporte 2 ou 3 sections.

Ils permettent une meilleure utilisation de la puissance des appareils avec un encombrement réduit. Ils peuvent être gradués.

c) POTENTIOMÈTRES MULTIPLES.

Un axe unique peut commander 2 ou 3 potentiomètres simultanément.

Deux axes concentriques permettent une commande indépendante de deux potentiomètres.

d) POTENTIOMÈTRES A UNE OU PLUSIEURS PRISES INTERMÉDIAIRES.

4° Limites d'emploi.

— R_n : de 1 Ω à 2,5 kΩ pour une puissance inférieure à 50 W, jusqu'à 5 kΩ (P_n = 100 W) et jusqu'à 10 kΩ (P = 250 W).

— *Tol.* : ± 10 % ± 5 %.

— P_n : de 25 W à 1 k W. A titre indicatif un potentiomètre de 25 W a 40 mm de diamètre extérieur alors qu'un modèle de 1 kW a 300 mm de diamètre.

— U_{max} : de 10 V à 10 000 V suivant puissance.

— *Température ambiante maximale :* + 200 °C. Au-delà de 40 °C la puissance dissipable diminue pour atteindre 0 % P_n à la température maximale. A 25 °C à pleine puissance la température de l'élément peut dépasser 300 °C.

— *Loi de variation :* linéaire à ± 5 % près.

— *Résistances résiduelles :* 0,2 Ω pour $R_n \leqslant 100\ \Omega$ et inférieure à 0,002 R_n pour des valeurs supérieures à 100 Ω.

— *Fiabilité :* pour obtenir une longue durée il ne faut pas charger le potentiomètre à plus de 50 % P_n, ni à plus de 70 % I_{max} pour le réglage le plus défavorable. Les potentiomètres doivent être choisis de façon que le curseur soit utilisé normalement au-delà de la moitié de l'enroulement sous leur puissance nominale.

C) Potentiomètres bobinés de précision.

1° Matériau.

On utilise des cupronickels qui ont un coefficient de température faible, ou des alliages or-argent-platine pour les faibles valeurs.

2° Fabrication.

Elle est semblable à celle des potentiomètres bobinés ordinaires avec certaines particularités de construction destinées à augmenter la précision.

a) Plaquette résistante.

Le fil de diamètre très régulier est enroulé sur une plaquette en matière plastique qui doit être sans défaut et de dimensions rigoureuses. Le fil est protégé par un émail spécial. Le bobinage doit être soumis à une tension mécanique constante et avoir une régularité parfaite. Le fil est maintenu sur le mandrin par un vernis Bakélite fongicide.

La mise à nu de la tranche où doit frotter le curseur s'effectue avec beaucoup de précautions car le fil ne doit être ni attaqué, ni usé anormalement. On utilise pour cette opération du tripoli ou de l'alumine.

b) Boîtier.

Il est en céramique, en aluminium, ou en Bakélite. Ses cotes doivent être précises et il doit permettre une concentricité rigoureuse de l'axe et de la résistance. Il est hermétiquement fermé.

c) Axe.

Il est en acier inoxydable, monté sur des roulements à billes miniatures également inoxydables. L'alésage des logements de roulements est effectué avec une tolérance de 2 à 3 microns.

d) Contacts.

Les extrémités de la résistance ne sont pas soudées mais serrées sous des pièces en laiton argenté.

Le contact mobile du curseur doit être indépendant de la température, de l'humidité et du temps. On utilise des alliages particuliers tels que le « Paliney » formé de platine, d'or, de cuivre, et de zinc. L'effort optimal du curseur sur le fil est compris entre 20 et 50 centinewtons.

3° Limites d'emploi.

— R_n : 5 Ω à 100 kΩ.

— *Tol.* : ± 5 % ± 1 %.

— P_n : quelques watts au maximum.

— *Lois de variation :* la loi peut être linéaire avec une tolérance sur la linéarité comprise entre ± 1 % et ± 0,15 %. On fabrique aussi des potentiomètres de précision dont la loi est logarithmique, parabolique, sinusoïdale ou particulière.

— *Résolution :* c'est le degré de continuité dans la variation de la tension de sortie en fonction de la rotation du curseur. Elle doit être faible pour ces potentiomètres.

— *Caractéristique de fréquence :* jusqu'à 100 kHz l'impédance varie peu. Au-delà de cette valeur il faut tenir compte de la variation d'impédance et du déphasage.

— *Vitesse de rotation :* 300 tr/mn au maximum.

— *Utilisations.* Ils sont utilisés dans des appareils de mesure de grande précision, des servomécanismes, des appareils de télécommande. Ils sont montés en général en détecteurs de déplacement angulaire ou de translation.

Il existe des modèles hélicoïdaux multitours (2 à 42 tours) dont le but est d'augmenter la résolution et la précision.

IV. POTENTIOMÈTRES AU CARBONE.

A) Matériau.

On utilise du carbone colloïdal dont la résistivité va de 4 000 à 6 000 μ Ω cm et dont le coefficient de température négligeable est légèrement négatif.

B) Fabrication.

1° Piste.

On mélange en proportions définies du carbone colloïdal, de la Bakélite liquide et un plastifiant, de façon à obtenir un enduit qui est étalé en couche uniforme par des rouleaux sur des bandes de Bakélite. Un séchage au four infra-rouge polymérisant la Bakélite donne une couche très dure.

Pour avoir des pistes à variation logarithmique, on dépose 3 couches de résistivités différentes côte à côte.

Les pistes sont découpées dans les bandes sur presse à découper.

Les extrémités sont métallisées d'argent pour obtenir un bon contact. Les cosses de sorties en laiton étamé sont agrafées ou fixées par rivets tubulaires (fig. 7-23).

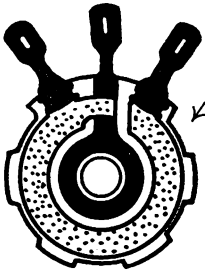


Fig. 7-23

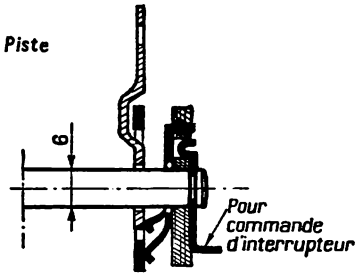


Fig. 7-24

Potentiomètres au carbone

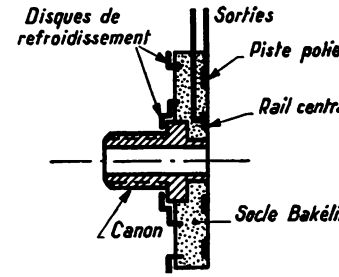


Fig. 7-25

Les potentiomètres professionnels ont une piste moulée en carbone aggloméré (fig. 7-25). Les lois de variation logarithmique sont obtenues au moyen de poudres de résistivités croissantes le long de la piste. Le poli parfait et la très grande dureté de la piste permettent d'appliquer une forte pression sur le curseur (force : 500 cN) et d'obtenir une rotation sans crachement ainsi qu'une très longue durée de vie.

2° Axe de commande.

Il est en acier de diamètre 6 mm, immobilisé en translation sur la canon par un jonc ou une rondelle. Il porte en bout une plaquette en Bakélite sur laquelle est immobilisé le curseur. L'axe peut comporter un méplat pour faciliter la fixation du bouton de commande, ou un trait de scie pour permettre sa manœuvre avec un tournevis.

3° Curseur.

Il est en bronze au béryllium, en chrysocale ou en maillechort. Il doit permettre un bon contact sans user la piste et ne doit pas s'oxyder. L'étude de sa forme est délicate car elle doit permettre une pression suffisante sans être excessive (fig. 7-24).

Le contact au lieu d'être direct peut être réalisé avec une touche en carbobronze (fig. 7-26). Certains constructeurs pour éviter l'usure de la piste créent le contact avec une lame élastique qui se déforme au passage de la touche isolante du curseur. Dans ce cas le curseur n'a pas besoin d'être isolé de l'axe (fig. 7-27).

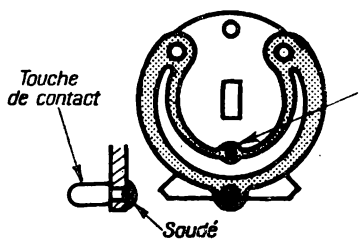


Fig. 7-26

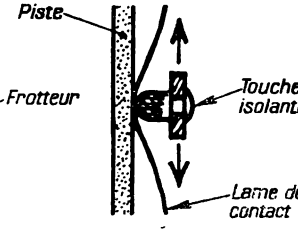


Fig. 7-27

La liaison électrique avec la cosse de sortie est directe alors que dans le cas de la figure 9-32 la liaison se fait par un frotteur, lié au curseur, appuyant sur un rail circulaire.

4° Boîtier.

a) Tole d'acier emboutie.

Il est en 2 parties. Le fond reçoit éventuellement l'interrupteur. Le couvercle est fixé au canon en laiton étamé par sertissage. Les cosses de sorties et la piste graphitée sont isolées du boîtier par une plaquette en carton bakélisé.

b) Bakélite.

Ici les cosses de sorties et la piste sont fixées directement sur le boîtier. Un couvercle en aluminium formant blindage ferme le boîtier par sertissage. Si le modèle comporte un interrupteur, celui-ci est enfermé dans un deuxième boîtier en Bakélite fixé au couvercle. Certains modèles existent avec une piste latérale.

c) Zamak.

Dans ce cas, le canon fait corps avec le boîtier. Cette réalisation permet l'obtention de potentiomètres miniatures.

5° Interrupteur.

L'interrupteur est à rupture brusque commandé par un ergot entraîné par l'axe (fig. 7-24). Ils doivent être séparés du potentiomètre par un blindage efficace étant donné qu'ils sont réunis au secteur qui pourrait induire dans le circuit du potentiomètre des courants provoquant des ronflements ou des parasites.

C) Différents modèles.

1° Classification d'après la loi de variation (fig. 7-28) (voir paragraphe VIII);

— potentiomètre linéaire : courbe 1,
— » logarithmique positif : courbe 2,
— » logarithmique négatif : courbe 3,
— » bilogarithmique : courbe 4 dite courbe en S,
— » à prise, dit à réglage physiologique : courbe 5.

La variation logarithmique droite est surtout utilisée dans les amplificateurs AF pour la commande de sonorité ou le contrôle de tonalité car la variation correspond à la sensibilité de l'oreille à l'intensité ou à la hauteur des sons (loi de Fechner).

La variation linéaire est surtout utilisée dans les diviseurs de tension ou dans des circuits de réaction.

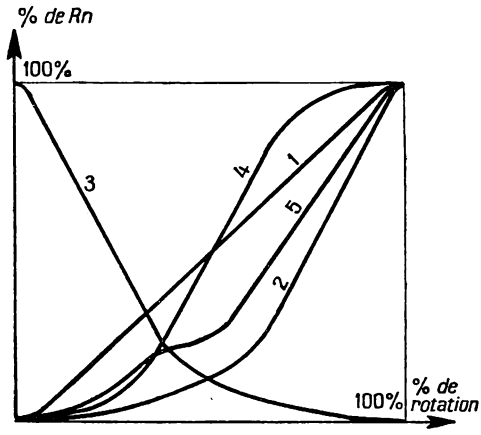


Fig. 7-28

Lois de variations des potentiomètres au carbone

2° Classification d'après le mode de fixation :

— par canon central (fig. 7-29),
— par vis latérales (fig. 7-30),
— par languettes soudables (fig. 7-31 et 7-36), ou serties (fig. 7-32).

Ces modèles sont spécialement étudiés pour les circuits imprimés.

3° Classification d'après le degré de sévérité climatique :

— potentiomètres amateurs ouverts ou fermés,
— potentiomètres professionnels normaux,
— potentiomètres tropicalisés.

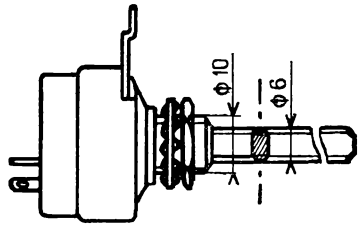
4° Classification d'après le mode de sorties :

— par cosses : axiales (fig. 7-31),
radiales (fig. 7-29),
— par fils : axiaux (fig. 7-33),
radiaux (fig. 7-34).

5° Classification d'après le mode de commande :

— par bouton (fig. 7-31),
— par tournevis (fig. 7-34),
— par molette : utilisation sur appareils miniatures de poche (fig. 7-35).

Fig. 7-29



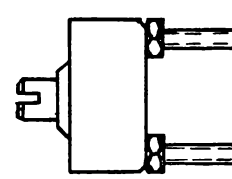
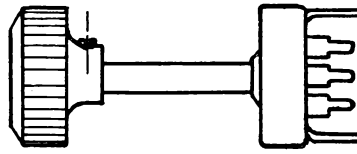


Fig. 7-30

Fig. 7-31



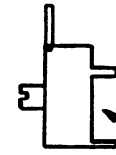


Fig. 7-32

Fig. 7-33

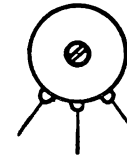
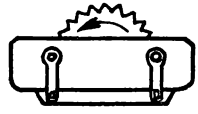


Fig. 7-34

Fig. 7-35



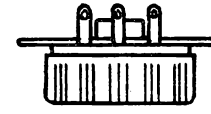


Fig. 7-36

Différents modèles de potentiomètres

6° Classification d'après l'encombrement :

— modèles ordinaires (fig. 7-29),
— modèles miniatures (fig. 7-33),
— modèles « bouton » destinés à être utilisés principalement dans les appareils de prothèse auditive, récepteurs miniatures... Le potentiomètre est logé à l'intérieur du bouton de commande (fig. 7-36).

7° Modèles spéciaux :

— avec interrupteur rotatif mono ou bipolaire (fig. 7-29),
— avec interrupteur à poussoir mono ou bipolaire,

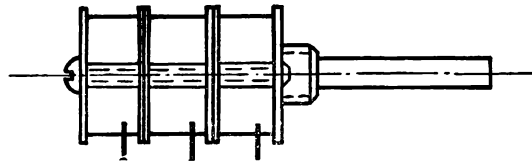


Fig. 7-37

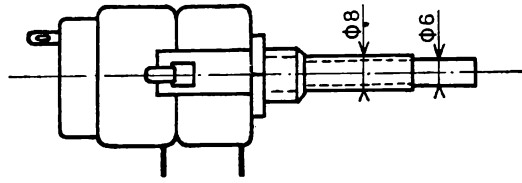


Fig. 7-38

Potentiomètres associés

— multiples : le même axe commandant deux (amplificateurs stéréophoniques) ou plusieurs potentiomètres simultanément (fig. 7-37),

— à 2 axes concentriques permettant une commande indépendante des 2 potentiomètres (exemple : puissance + tonalité) (fig. 7-38).

D) Limites d'emploi.

— R_n : de 50 Ω à 10 M Ω.

— *Tol.* : ± 10 % ± 20 %.

— *Loi de variation :* linéaire ou logarithmique avec une tolérance de ± 5 % en milieu de course.

— P_n : de 0,1 W à 2,25 W. Pour un même modèle la puissance nominale est 2 à 3 fois plus faible pour la variation logarithmique.

— U_{max} : de 25 à 600 V suivant les puissances.

— *Plage de température :* soit (— 40 °C + 85 °C), soit (— 60 °C + 100°C). Au-delà de + 40 °C la puissance dissipable diminue pour atteindre 0 % P_n à la température maximale.

— *Résistances de début et de fin de course :* 1 à 5 % de R_n jusqu'à 500 Ω et inférieures à 0,5 % de R_n au-dessus.

— *Résistance de contact :* 6 à 10 % de R_n.

— *Bruit de fond :* il est assez élevé mais toujours inférieur à 15μV /V.

— *Crachement en rotation :* inférieur à 20 μV/Vcc.

— *Caractéristique de fréquence :* il existe une capacité parasite en parallèle de 2 à 5 pF sur la résistance dont la valeur décroît lorsque la fréquence augmente. Leur comportement en HF au-delà de 10 MHz est peu satisfaisant.

— *Angle de rotation :* de 240° à 312°.

— *Fiabilité :* On ne doit pas dépasser 50 % de la puissance nominale dans la position la plus défavorable pour obtenir une bonne fiabilité.

Les potentiomètres à piste moulée dissipent des puissances plus élevées et admettent des surcharges momentanées. Leur durée de vie est élevée, leurs coefficients de température et de tension sont très faibles.

V. POTENTIOMÈTRES A COUCHE D'OXYDE.

1° Matériau.

Couche d'oxyde d'étain avec un peu d'oxyde d'antimoine déposée sur un support en verre par photogravure.

Le curseur est réalisé en alliage de cuivre, argent, or ou de platine, iridium. Les sorties sont soudées sur des métallisations or ou argent.

2° Limites d'emploi.

— R_n : les variations d'épaisseur et de résistivité permettent de couvrir la plage normale des valeurs de résistance.

— *Tol.* : ± 5 ± 2 ± 1 %.

— P_n : 1/4 W à 4 W.

— *Plage de température* : — 55 à + 150 °C ou — 150 à + 250 °C.

— *Bruit de fond* : très faible et égal à 0,01 μV/V.

— *Linéarité* : 0,05 %.

— *Résolution* : très faible.

— *Vitesse de rotation* : elle peut atteindre 2 000 tr/mn.

— *Fiabilité* : elle est excellente. La durée de service est de l'ordre de 5 millions à 50 millions de mouvements de curseur sur un point de la piste.

VI. POTENTIOMÈTRES AJUSTABLES.

A) Généralités.

Ils sont utilisés comme potentiomètres d'appoint, pour ajuster un diviseur de tension, pour régler le point milieu d'un circuit de chauffage. On peut utiliser un potentiomètre ordinaire en potentiomètre ajustable, mais il est préférable d'utiliser des potentiomètres spécialement construits pour ce genre d'applications qui sont moins coûteux et moins encombrants. Le réglage se fait par tournevis.

B) Différents types.

1° Ajustables bobinés (Loto, Baby...).

Résistances nominales de 10Ω à 10 kΩ. Puissance nominale : 1 W. Ils sont ouverts, en boîtier Bakélite ou Rilsan. Si nécessaire ils peuvent être protégés par un cache-poussière.

2° Ajustables au carbone (fig. 7-39).

Résistances nominales de 1 kΩ à 5 kΩ. Puissance nominale : 0,25 W. Des modèles miniatures peuvent être directement incorporés au câblage ou utilisés sur circuits imprimés.

Ils permettent un réglage précis des polarisations des transistors ou des formes de signaux en télévision.

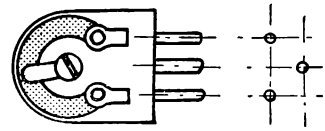


Fig. 7-39
Potentiomètre ajustable au carbone

3° Ajustables type « Cermet » (fig. 7-40).

L'élément résistant comporte une couche de 0,01 à 0,1 mm d'un mélange de métaux précieux dans un liant de verre, fritté sur une base en céramique.

Les composés cermet permettent de réaliser des potentiomètres d'appoint miniatures ayant une gamme de résistances allant de 10 Ω à 1 MΩ (1/2 à 2 W) utilisées dans les microcircuits. Ces potentiomètres ont une linéarité, une résolution très bonnes ainsi qu'une excellente fiabilité.

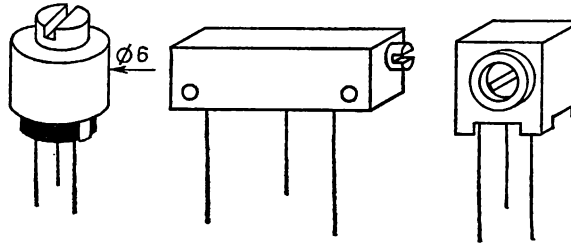


Fig. 7-40
Potentiomètres ajustables cermet

VII. PROTECTION DES POTENTIOMÈTRES.

A) Matériel " grand public ".

Ils sont ouverts ou fermés non étanches.

Aucune protection particulière contre l'étanchéité ou la corrosion n'est prise.

B) Matériel professionnel.

Le boîtier est en matière plastique moulée ou en céramique qui ne doivent pas absorber l'humidité ou se déformer.

L'axe et le canon sont cadmiés. Les parties frottantes sont lubrifiées avec une graisse conductrice qui ne sèche pas et ne gomme pas.

Le boîtier est étanche mais le passage de l'axe ne l'est pas.

C) Matériel tropicalisé.

Le boîtier est en cuivre soudé étanche ou en laiton argenté étamé ou nickelé. Les sorties se font à travers une matière céramique moulée ou, le plus souvent, par des perles de verre. Le verre est soudable aux métaux utilisés car il a le même coefficient de dilatation.

L'étanchéité au passage de l'axe est réalisée par un presse garniture de Néoprène avec graissage à l'huile de silicone. L'axe est cadmié. Le boîtier est recouvert d'un produit fongicide et d'un vernis au silicone.

VIII. LOIS DE VARIATIONS DES POTENTIOMÈTRES.

Elles montrent les relations théoriques qui existent entre la résistance nominale et l'angle de rotation.

1° Variation linéaire ou arithmétique (fig. 7-41).

$$R = a\alpha.$$

Les portions de résistance parcourues sont proportionnelles aux déplacements angulaires du curseur.

2° Variation logarithmique gauche ou négative (fig. 7-42).

$$R = a \lg (\alpha + 1)$$

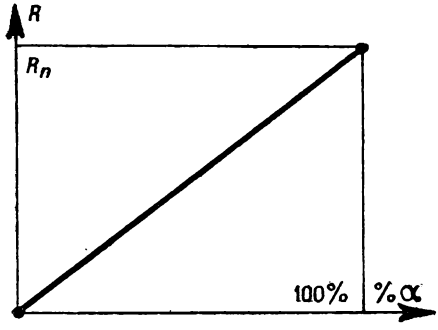


Fig. 9-47

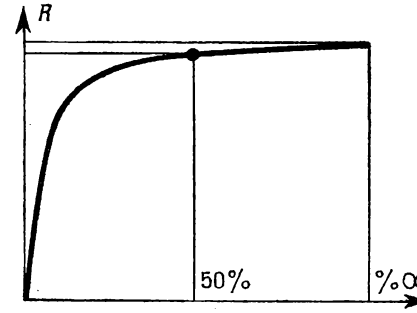


Fig. 9-48

3° Variation logarithmique droite ou positive (fig. 9-49).

$$(R + 1) = 10\alpha \quad \text{ou} \quad \alpha = a \lg (R + 1)$$

4° Variation bilog ou courbe en S (fig. 7-44).

La courbe est formée dans la première moitié d'une courbe logarithmique droite et dans la deuxième moitié d'une courbe logarithmique gauche.

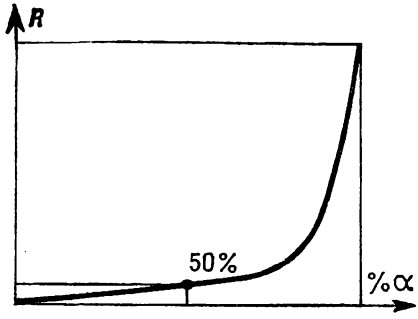


Fig. 7-43

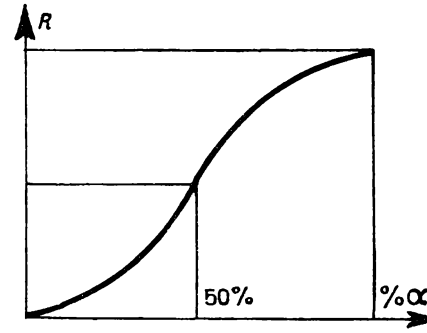


Fig. 7-44

IX. ESSAIS.

A) Généralités.

Les essais se groupent, d'une part en essais d'homologation requis pour vérifier que la production d'un constructeur déterminé peut satisfaire aux conditions imposées par les spécifications normalisées, et d'autre part en essais de réception requis pour contrôler les livraisons.

B) Classification.

1° Examens visuels :

— Dimensions.
— Aspect.
— Marquage.

2° Essais électriques :

— Résistance totale.
— Résistances résiduelles.
— Résistance à mi-course ou loi de variation (5 positions).
— Rigidité diélectrique.
— Résistance d'isolement.

3° Essais climatiques :

— Froid, chaleur sèche.
— Chaleur humide (essais de longue durée, et accéléré).
— Variations rapides de température.
— Basse pression atmosphérique.
— Brouillard salin.
— Immersion.

4° Essais mécaniques :

— Vibrations.
— Chocs répétés.
— Robustesse des sorties.
— Soudure et soudabilité.
— Traction et poussée sur l'axe.
— Couple de rotation.
— Butées.
— Dispositif de blocage de l'axe.
— Dispositif de fixation.
— Etanchéité des passages (matérie professionnel).

5° Essais divers :

— Endurance.
— Durée de vie en fonctionnement.
— Essais relatifs à l'interrupteur si le potentiomètre en comporte un.

Nota. — Les essais ci-dessus ont rapport aux potentiomètres. Les essais concernant les résistances ajustables sont identiques à ceux des résistances bobinées.

Le nombre et le type d'essais subis sont variables suivant le type de potentiomètre (consulter les normes).

Sauf stipulation contraire tous les essais sont effectués dans les conditions atmosphériques normales de mesures spécifiées dans les normes générales sur les essais.

X. NORMES.

UTE C 93-001. Essais généraux climatiques et mécaniques (1961).
UTE C 93-002. Composants électroniques. Généralités. Inspection par attributs (1961).
UTE C 93-251. Potentiomètres non bobinés (1961).
FNIE 008. Axes de commande des pièces détachées électroniques (1959).
CCT 05-01. Potentiomètres non bobinés (1958). Mod. 1 (1959). Mod 2. (1961).
CCT 05-02. Potentiomètres bobinés de faible dissipation (1959). Mod. 1 (1961).
CCT 05-03. Potentiomètres bobinés de forte dissipation (1959). Mod. 1 (1961).
CCT 05-04. Potentiomètres bobinés de précision (1961).
CCT 04-07. Résistances bobinées ajustables à forte dissipation (1961).

CHAPITRE 8

LES CONDENSATEURS FIXES

I. GÉNÉRALITÉS.

A) Définition.

Un condensateur est un système de deux conducteurs (armatures) séparés sur toute l'étendue de leur surface par un milieu isolant de faible épaisseur (diélectrique).

Le choix du diélectrique dépend essentiellement :

— de sa permittivité, ε ;
— de sa rigidité diélectrique;
— de son facteur de pertes, $\mathrm{tg}\,\delta$;
— des variations de ses propriétés en fonction de la température.

Si l'on tient compte des pertes qui ont été examinées au chapitre 2, le condensateur possède une résistance série qui en limite l'emploi au-dessus d'une certaine fréquence et une résistance parallèle qui en limite l'emploi au-dessous d'une certaine fréquence (courant de fuite important) (fig. 8-1).

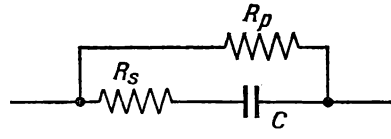


Fig. 8-1

B) Rappel de formules.

1° Capacité d'un condensateur à armatures planes.

$$C = \varepsilon \frac{S}{e},$$

soit $$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{e},$$

avec $$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{9 \times 4\pi} \text{ C/V.m.}$$

ε_0 : permittivité du vide.
ε_r : permittivité relative (fonction du diélectrique choisi).
S : surface d'une armature (m^2)
e : épaisseur du diélectrique (m).

Cette formule est applicable pour des formes différentes si les armatures sont de même surface et si l'épaisseur du diélectrique est faible.

2° Energie d'un condensateur chargé.

$$W = 1/2\ CU^2.$$

W en joules, C en farads, U en volts.

3° Association de condensateurs.

en parallèle $C = \Sigma\, c$

en série $$\frac{1}{C} = \Sigma \frac{1}{c}.$$

4° Impédance d'un condensateur.

Si R représente la résistance série équivalente d'un condensateur on a :

$$Z = \sqrt{R^2 + 1/C^2\omega^2}, \quad \text{avec} \quad \omega = 2\pi f.$$

En très haute fréquence on peut être amené à tenir compte de l'inductance propre du condensateur.

5° Coefficient de qualité d'un condensateur.

$$Q = \frac{1}{RC\omega} = \frac{1}{\text{tg}\,\delta}.$$

C) Terminologie.

1° Capacité nominale C_n. — Capacité pour laquelle est prévu le condensateur.

2° Tolérance sur la capacité nominale.

3° Tension nominale en courant continu, U_{ncc}. — Valeur de la tension continue qui peut être appliquée au condensateur en régime permanent à la température maximale.

4° Tension nominale en courant alternatif, U_{nca}. — Valeur de crête de la tension alternative de fréquence comprise entre 50 et 60 Hz pouvant être appliquée au condensateur en régime permanent à la température max.

5° Courant nominal à une fréquence déterminée, I_n. — Valeur efficace la plus élevée du courant pouvant traverser le condensateur sans échauffement anormal.

6° Coefficient de température $\frac{\Delta C}{C \Delta t}$. — Quotient de la variation relative de capacité par la variation de température. Il est exprimé en millionièmes par degré Celsius.

7° Facteur de pertes ; $\operatorname{tg} \delta$ (voir chapitre 2).

8° Courant de fuite, I_f. — Courant qui traverse un condensateur électrolytique après avoir appliqué pendant 10 minutes la tension nominale.

9° Plage nominale de températures. — Elle est limitée par les températures minimale et maximale qui ne doivent pas être dépassées en régime permanent.

10° Résistance d'isolement, R_i. — C'est la résistance mesurée entre les bornes sous une certaine tension continue.

Au-dessus de 0,1 μF on considère le produit $R_i . C_n$ exprimé en secondes. C'est la constante de temps de décharge du condensateur sur sa résistance de fuites.

11° Dérive de capacité. — C'est l'écart relatif mesurant la variation de capacité après cycle thermique.

12° Coefficient énergétique. — Il est donné par la relation

$$W = \frac{1}{2} C_n U_n^2.$$

13° Gamme des fréquences d'utilisation.

14° Durée de vie.

Nota. — Les caractéristiques à considérer sont variables suivant les types et les modèles de condensateurs.

D) Identification.

1° Le type. — Il correspond à la nature du diélectrique choisi.

2° Le modèle. — Il est caractérisé par la forme générale extérieure, le mode de sorties, le mode de fixation.

3° La catégorie. — Elle est codifiée (norme UTE) par un ensemble de deux chiffres désignant la sévérité des essais au froid et à la chaleur.

Eventuellement un troisième chiffre pour le matériel subissant des essais de chaleur humide (Exemples : durée des essais 4 jours, chiffre 6 - durée des essais 21 jours, chiffre 5, etc.).

1er chiffre	Froid sec (°C)	2e chiffre	Chaleur sèche (°C)
—	—	2	+ 155
3	— 70	3	+ 125
4	— 55	4	+ 100
5	— 40	5	+ 85
6	— 25	6	+ 70
7	— 10	7	+ 55

4° La classe. — Suivant le type de condensateur, il existe plusieurs classes (1 à 4) d'après le coefficient de température ou d'après l'isolement (produit $R_i \cdot C_n$).

5° La capacité nominale C_n. — Les valeurs normales sont celles des multiples ou sous-multiples des séries ci-dessous.

± 20 %	10				15				22				33				47				68					
± 10 %	10		12		15		18		22		27		33		39		47		56		68		82			
± 5 %	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91		

6° La tolérance sur C_n.

7° La tension nominale en courant continu U_{ncc}.

Les tensions nominales en courant continu normalisées sont :

63 — 100 — 160 — 250 — 400 — 630 — 1 000 — 2 000 — 3 000 — 4 000 — 5 000 V.

II. CONDENSATEURS A DIÉLECTRIQUE SOLIDE.

A) Condensateurs au mica.

1° Diélectrique. — Le mica est un silicate double d'aluminium et de potassium.

Résistivité : $\rho = 10^3$ à 10^5 TΩcm.
Rigidité diélectrique : 700 kV/cm pour lames de 0,1 à 1 mm d'épaisseur.
Permittivité : $\varepsilon_r = 6{,}5$ à 9 suivant la provenance (Madagascar, Indes, etc.).
Facteur de pertes : $\operatorname{tg}\delta = 0{,}001$ à 1 MHz.

2° Différents types.

a) ARMATURES MÉTALLISÉES ARGENT.

1. Fabrication. — Les lamelles de mica, après clivage sont tirées au micromètre, contrôlées puis découpées aux dimensions. Unefeuille de 5 centièmes de millimètre correspond à une tension de service de 350 volts en viron.

L'argenture se fait soit par évaporation cathodique, soit par métallisation au pistolet. Des caches permettent de ne déposer l'argent qu'aux endroits strictement nécessaires.

Les cosses de sorties sont soudées directement sur l'argenture ou montées avec interposition de lamelles en cuivre rouge assurant un bon contact.

Pour augmenter la stabilité un vieillissement artificiel peut être réalisé en usine.

2. Protection. — Elle est assurée sur les condensateurs ordinaires par une plaquette de carton bakélisé. Ils sont imprégnés par trempage de cire ozokérite ou de résine époxy.

Les condensateurs tropicalisés sont protégés par une lame de mica enrobée d'ozokérite recouverte d'un vernis fongicide ou sont enfermés dans un boîtier céramique rempli de cire ou d'huile minérale spéciale. Certains constructeurs réalisent la protection climatique par imprégnation sous vide avec un vernis silicone. Le tout est enfermé dans un moulage en Bakélite ou en Araldite.

3. Différents modèles.

● Modèles grand public.
— De faible valeur (fig. 8-2).
— De forte valeur, à lames empilées (fig. 8-3).

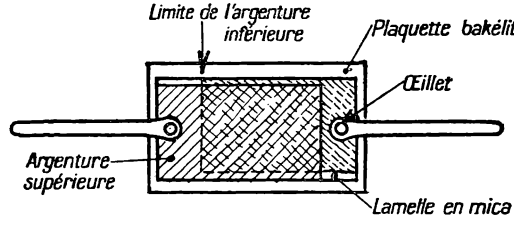


Fig. 8-2

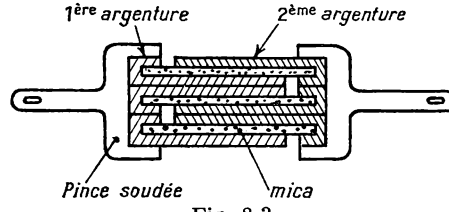


Fig. 8-3

— A cosses parallèles (fig. 8-7 et 8-6). Ils sont particulièrement indiqués sur les circuits imprimés.

● Modèle professionnel tropicalisé (fig. 8-5).

Circuits HF sur matériel professionnel.

● Modèle pour T.H.T. (fig. 8-4).

Circuits HF à tension élevée, circuits de faible puissance des émetteurs et en télévision.

● Modèle T.H.T. pour températures extrêmes (fig. 8-8).

Emetteurs récepteurs de trafic, radar, matériel aéronautique.

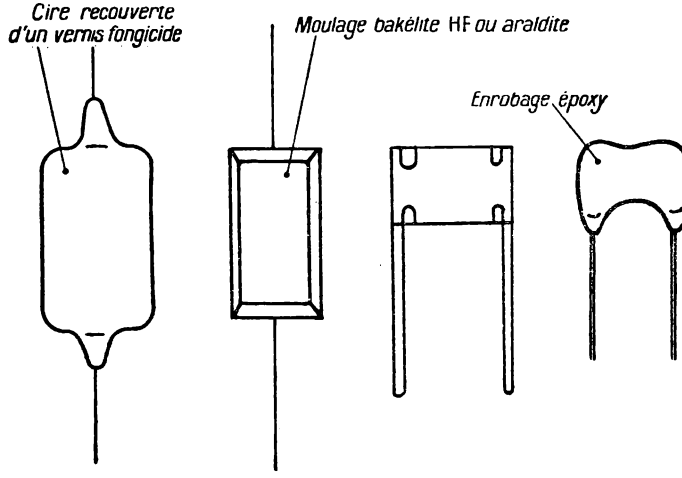


Fig. 8-4 Fig. 8-5 Fig. 8-6 Fig. 8-7

Modèles de condensateurs au mica

b) ARMATURES EN LAMELLES.

1. Anciens modèles.

Les armatures sont constituées par des lames de métal (cuivre ou laiton) séparées par des feuilles de mica. Elles sont serrées par des plaquettes en carton bakélisé et enrobées dans de la Bakélite moulée.

2. Modèle pour émetteur.

Les armatures en cuivre argenté sont séparées par des lames de mica. Le tout fortement comprimé est placé dans un boîtier céramique imprégné sous vide.

3. Modèle pour découplage ondes métriques (fig. 8-9).

L'une des électrodes est reliée à la masse, l'autre à un conducteur central. Ils sont circulaires et peuvent être blindés pour fortes capacités.

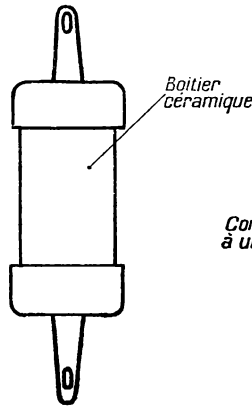


Fig. 8-8

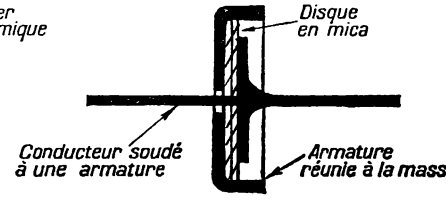


Fig. 8-9

Condensateurs au mica

3° Limites d'emploi.

— C_n : de 2 pF à 220 nF.

— *Tol.* : ± 10 % ± 5 % ± 2 %.
± 1 % pour C $\geqslant$ 100 pF.
± 0,5 % pour C $\geqslant$ 180 pF.

— U_{ncc} : 160, 300, 500, 750, 1 000, 2 000 V.

— *Isolement* : $R_i > 10\,000$ MΩ à 20 °C pour $C_n > 10$ nF.
$R_i > 50\,000$ MΩ à 20 °C pour $C_n > 10$ nF.

— *Plages de températures* :
— 55 °C à + 125 °C pour protection Araldite.
— 25 °C à + 70 °C pour les autres.

— *Cœfficient de température* : il est faible.
Classe 1 : $|\ \alpha\ | \leqslant 200 \times 10^{-6}$/°C.
Classe 2 : $|\ \alpha\ | \leqslant 100 \times 10^{-6}$/°C.
Classe 3 : α de — 20 à + 50 $\times 10^{-6}$/°C.

— *Limite de fréquence* : 200 MHz et plus.

La tension de service maximale en HF va de 200 à 1 000 V suivant les modèles mais à 30 MHz, par exemple, elle est 10 à 100 fois plus faible que U_{ncc}.

B) Condensateurs céramiques.

1° Diélectrique.

a) GROUPE 1. — Condensateurs céramiques à coefficient de température défini.

	Permittivité ε_r	Coeff. de température
Stéatite	6,5	$+ 130 \times 10^{-6}$
Titanate de magnésium ..	15	$+ 100 \times 10^{-6}$
Titanates de magnésium corrigés	20	$- 30 \times 10^{-6}$
	35	$- 100 \times 10^{-6}$
Oxyde de titane	90	$- 750 \times 10^{-6}$
Titanate de calcium	150	$-1\,400 \times 10^{-6}$
Titanate de strontium....	220	$-3\,000 \times 10^{-6}$

Résistivité : $\rho = 10$ à 10^3 TΩcm
Facteur de pertes : $\operatorname{tg}\delta = 10^{-3}$ à 10^{-4} à 1 MHz
Rigidité diélectrique : 35 à 90 kV/cm.

Ils donnent des condensateurs stables et précis de haute qualité.

b) GROUPE 2. — Condensateurs céramiques à coefficient de température non défini.

A base de titanate de baryum et de strontium.
Permittivité : $\varepsilon_r = 1\,000$ à $10\,000$
Résistivité : $\rho = 1$ à 10 TΩcm
Rigidité diélectrique : 30 à 60 kV/cm
Facteur de pertes : $\operatorname{tg}\delta = 250 \times 10^{-4}$.

Le coefficient de température est variable et instable.

L'énorme permittivité crée une pression électrostatique qui peut fendre le diélectrique surtout en régime d'impulsions. Ces céramiques ont des propriétés piézoélectriques et possèdent de l'hystérésis à la température. Elles donnent des condensateurs miniatures instables, imprécis utilisés pour le découplage.

2° Fabrication.

On mélange et on broie finement du silicate de magnésie (talc), de l'alumine et du corindon avec lesquels on ajoute des oxydes de titane, baryum ou strontium. La poudre obtenue est séchée, tamisée puis moulée sous pression

avec de l'argile ou un liant organique et cuite à une température supérieure à 1 000 °C.

Les pièces obtenues sont émaillées au four électrique pour supprimer leur porosité.

Les armatures sont obtenues par métallisation d'argent sur les deux faces.

3° Protection.

Elle est assurée normalement par une couche de peinture laquée cuite au four. Les condensateurs de découplage peuvent être enrobés sous vide d'une cire isolante pour améliorer leur isolement.

4° Différents modèles.

a) CONDENSATEURS CIRCUIT.

Ils utilisent un diélectrique à faibles pertes et à coefficient de température peu élevé. Ces condensateurs correspondent à l'emploi le plus général.

Ils sont à sorties radiales (fig. 8-10 et 8-11) ou mixtes (fig. 8-13) quelquefois axiales (fig. 8-12) pour certains condensateurs de réception professionnels.

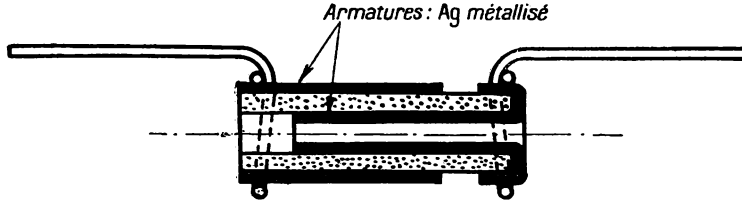


Fig. 8-10

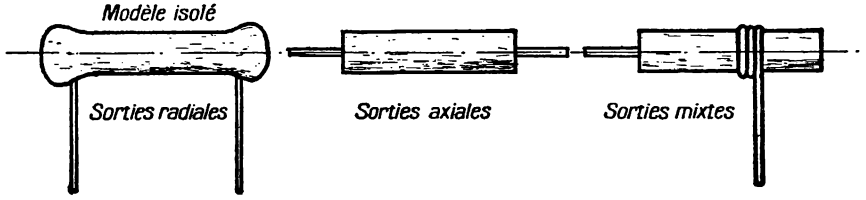


Fig. 8-11 Fig. 8-12 Fig. 8-13

Condensateurs céramiques

b) CONDENSATEURS A COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE DÉFINI.

Leur coefficient de température bien défini s'ajoutant à leurs autres qualités permet de les utiliser en correction de dérive.

Ils sont généralement tubulaires.

c) CONDENSATEURS A GRANDE STABILITÉ.

Leur stabilité en fonction de la température est obtenue par association de deux céramiques, l'une à coefficient de température négatif, l'autre à coefficient de température positif (orthotitanate de magnésie).

d) CONDENSATEURS DE LIAISON.

Ils utilisent des diélectriques à faibles pertes et sont réalisés avec une large tolérance sur la capacité. Ils sont donc économiques dans les emplois où cette tolérance est justifiée. Ils sont tubulaires.

e) CONDENSATEURS DE DÉCOUPLAGE.

Ils sont réalisés avec des céramiques du groupe 2 et présentent donc une forte capacité sous un très faible encombrement d'où leur emploi au découplage HF.

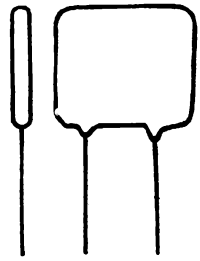


Fig. 8-14

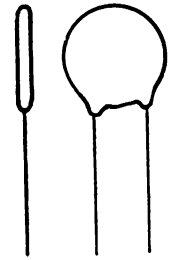


Fig. 8-15

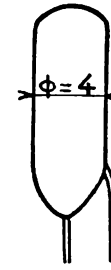


Fig. 8-16

Condensateurs de découplage

Ce sont des condensateurs subminiatures tubulaires, perles (fig. 8-16), pastilles (fig. 8-15), plaquettes (fig. 8-14).

Il existe des condensateurs doubles ou triples tubulaires (fig. 10-18) ou plaquettes (fig. 8-17) qui permettent une réduction de l'encombrement dans les circuits de découplage HF ou MF et présentent un intérêt particulier dans les circuits imprimés. Ils ont une armature commune reliée à la masse.

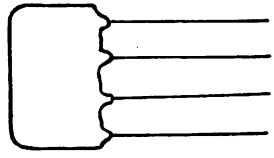


Fig. 8-17

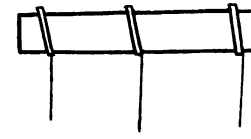


Fig. 8-18

Condensateurs multiples

f) CONDENSATEURS « BY-PASS ».

Ces condensateurs robustes servent au découplage de fils traversant un châssis ou un blindage.

— modèle à écrous (fig. 8-19),
— modèle bouton (fig. 8-20),
— modèle à œillet (fig. 8-21).

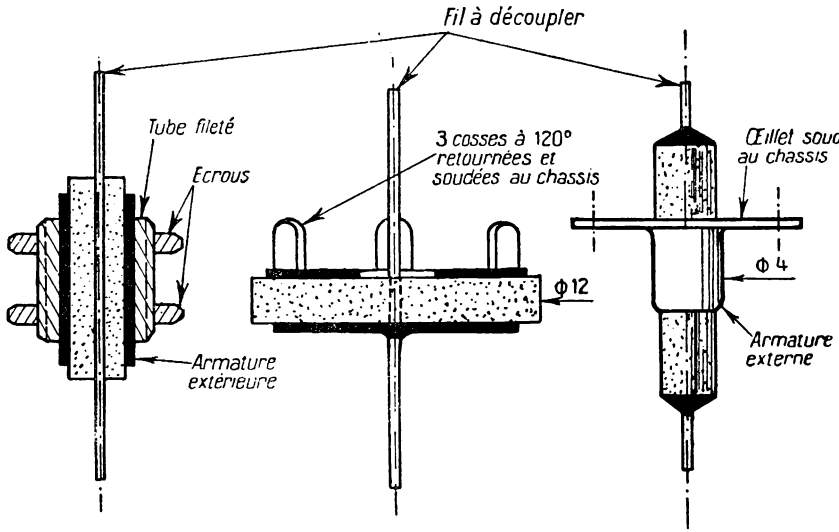


Fig. 8-19 Fig. 8-20 Fig. 8-21

Condensateurs « By-pass »

g) CONDENSATEURS T.H.T.

Ils supportent des tensions particulièrement élevées. Ils sont utilisés dans le filtrage T.H.T. en télévision ou dans les doubleurs de tension (fig. 8-22).

h) CONDENSATEURS DE PUISSANCE.

Leur diélectrique a un facteur de pertes extrêmement faible ce qui leur permet de supporter des puissances réactives importantes. Leur forme est étudiée pour éviter les contournements et les bornes taraudées soudées sur cuivrage permettent le passage de fortes intensités. La tension de service dans l'air peut être multipliée par 3 à 5 si le condensateur est refroidi par air

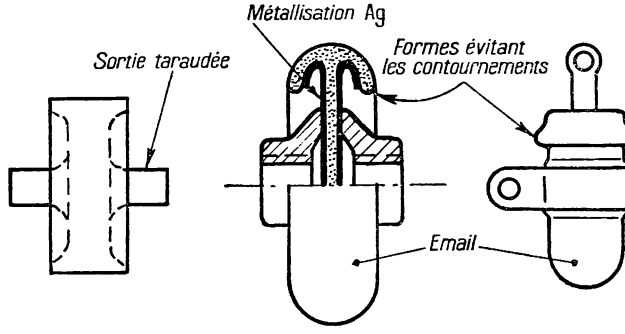


Fig. 8-22 Fig. 8-23 Fig. 8-24

Condensateurs céramiques de puissance

pulsé ou par immersion dans l'huile. Ils sont utilisés dans les circuits de puissance des émetteurs pour des fréquences de 100 kHz à 1 000 MHz.

Il existe différents modèles : tubulaires, assiette (fig. 8-23), en pot (fig. 8-24) pour des puissances de 1 à 60 kVA.

i) CONDENSATEURS FILIFORMES « PHILIPS ».

Un fil de cuivre est placé dans un tube de cuivre étamé avec une poudre diélectrique. Après étirage on obtient un fil de 1 mm de diamètre ayant une capacité de 20 pF par cm. Ils sont excellents sous un volume dix fois plus faible que les condensateurs tubulaires classiques.

j) CAPRESTANCES.

Ce sont des éléments mixtes comportant des résistances et des condensateurs associés, ce qui permet un gain de poids et d'espace et une réduction du temps de montage.

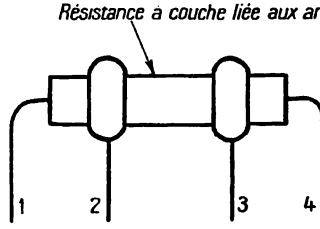


Fig. 8-25

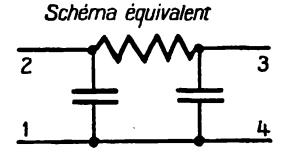


Fig. 8-26

Caprestances

Utilisation comme cellule de découplage, filtre de détection (fig. 10-25 et 10-26).

Des petits blocs parallélépipédiques moulés en résine thermodurcissables peuvent comprendre en moyenne sept composants (par exemple, 5 résistances et 2 condensateurs).

5° Limites d'emploi.

a) CONDENSATEURS CÉRAMIQUES GROUPE I.

— C_n : de 1 pF à 1 nF. On ne fabrique pas de condensateurs céramiques à fortes capacités car les épaisseurs de diélectriques inférieures à quelques dixièmes de millimètres, provoquent l'instabilité.

— *Tol.* : ± 20 % ± 10 % ± 5 % ± 2 %.
± 1 pF, ± 0,5 pF, ± 0,25 pF pour $C_n \leqslant 10$ pF.

— U_{ncc} : 250, 500, 1 000 V.

— *Isolement* : $R_i > 10\,000$ MΩ.

— *Plages de températures* :
— 40 °C + 85 °C ou — 55 °C + 150 °C.

On ne doit pas dépasser 80 % de U_{ncc} à 100 °C.

— *Cœfficients de température*, en millionièmes par °C. :
+ 100. + **0**, — **33**, — 47, — **75**, — **150**, — 220, — **330**, — 470, — **750**.

Les valeurs en caractères gras sont recommandées,
Il existe 4 classes en fonction de la tolérance sur α.

— *Limites de fréquences* : 20 kHz $< f <$ 50 MHz.

En dessous de 20 kHz les pertes sont trop grandes et au-dessus de 50 MHz il faut choisir des modèles subminiatures.

— *Puissance maximale* : 0,3 VAR/pF avec un maximum de 100 VAR et $I_{eff\,max}$ de 2,5 mA.

— *Fiabilité* : moyenne due à une protection insuffisante.

— *Utilisations* : condensateurs de liaison, d'accord, de correction de dérive.

b) CONDENSATEURS CÉRAMIQUES GROUPE II.

— C_n : de 470 pF à 220 nF.

— *Tol.* : ± 20 % — 20 + 50 % 0 + 100 %.

— U_{ncc} : 35, 63, 100, 160, 250, 500, 1 000 V.

— *Isolement* : 5 000 MΩ $< R_i >$ 100 000 MΩ.

— *Cœfficient de température* : il n'est pas défini, mais il existe 4 classes en fonction des variations de capacité entre — 55 et + 85 °C.

— *Limites de fréquences* : 50 Hz $< f <$ 50 MHz.

La capacité diminue quand la fréquence augmente. Par exemple de 1 kHz à 10 MHz elle diminue de 10 %.

— *Puissance* : il faut veiller à ce que le courant alternatif qui les traverse soit faible sinon on a une forte dissipation d'énergie due aux pertes par hystérésis.

— *Stabilité* : elle est médiocre car la variation de capacité dans le temps atteint 20 %.

— *Fiabilité* : elle est bonne s'ils sont suffisamment protégés.

— *Utilisations* : condensateurs de découplage.

C) Condensateurs au papier.

1° Diélectrique.

a) PAPIER.

On emploie exclusivement du papier en cellulose pure. Il est calandré sous pression pour obtenir un papier tenace, d'épaisseur uniforme allant de 0,001 à 0,01 mm suivant les tensions qui seront supportées (30 V par micron). La résistance mécanique est élevée pour qu'il ne se déchire pas pendant le bobinage.

Les caractéristiques diélectriques du papier sont faibles et on les améliore par imprégnation. Le produit d'imprégnation choisi est fonction de l'utilisation.

Le papier doit avoir une porosité suffisante et régulière pour obtenir une bonne imprégnation.

b) PRODUITS D'IMPRÉGNATION.

— Paraffine, ozokérite : ne supportent pas de températures élevées.
— Naphtalène chloré : permet des dimensions plus réduites.
— Huile minérale : pour matériel tropicalisé.
— Huile synthétique (pyralène) : supporte des conditions très dures.
— Araldite : volume réduit sous température élevée.

Suivant l'emploi auquel sont destinés les condensateurs on ajoute aussi à l'imprégnant un stabilisateur qui assure le maintien des propriétés initiales et améliore les propriétés électriques.

c) CARACTÉRISTIQUES.

— Résistivité : $\rho = 1$ à $1\,000$ TΩ cm pour le papier sec ;
$\rho = 10^4$ à 10^5 TΩ cm pour le papier paraffiné.
— Rigidité diélectrique = 200 kV/cm pour le papier sec;
300 à 800 kV/cm suivant l'imprégnation.
— Permittivité : $\varepsilon_r = 2$ à 5 suivant imprégnation.
— Facteur de pertes : $\operatorname{tg}\delta = 0{,}005$ à $0{,}003$ à 50 Hz.

Ces valeurs montrent bien que l'on ne peut utiliser le papier qu'imprégné.

2° Fabrication.

a) CONDENSATEURS ORDINAIRES AU PAPIER.

1. Bobinage.

Les armatures en aluminium de 4 à 10 microns d'épaisseur, sont enroulées sur machine à bobiner avec interposition de 2 à 6 feuilles de papier. On utilise

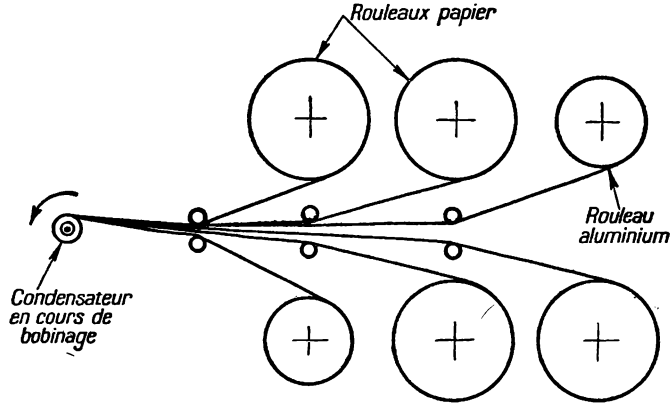


Fig. 8-27
Schéma de bobinage

au moins deux épaisseurs de papier de façon que les imperfections microscopiques du papier se compensent (fig. 8-27). Un compte-tour permet d'arrêter la machine lorsque la capacité est atteinte. Les feuilles sont pincées et sont coupées avec un couperet.

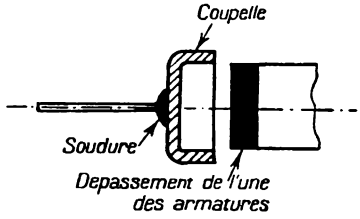


Fig. 8-28

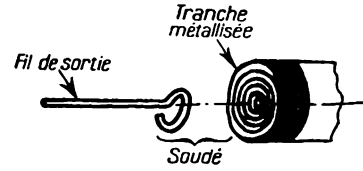


Fig. 8-29

Fixation des sorties

2. Fixation des sorties.

— Le premier procédé consiste à laisser déborder chacune des armatures et à serrer la partie débordante dans une coupelle sur laquelle est fixée le fil de sortie (fig. 8-28). Le contact n'est pas parfait.

— Le deuxième procédé généralement adopté sur la plupart des condensateurs modernes consiste à métalliser la tranche dépassante de chaque armature, par évaporation cathodique avec du cuivre. Les fils de sortie sont soudés sur cette métallisation. On obtient des condensateurs non inductifs. Le contact est parfait et l'encombrement faible (fig. 8-29).

3. Imprégnation.

Il est de la plus haute importance que pendant l'imprégnation toute trace d'humidité soit éliminée. Dans ce but, elle se fait à chaud aux environs de 150 °C et sous vide pendant 4 à 12 heures suivant le volume du condensateur.

4. Limites de capacités et de tension.

— On ne peut pas utiliser des surfaces d'armatures trop grandes car l'imprégnation devient mauvaise ($\varnothing < 15$ mm).

— On ne peut pas utiliser des épaisseurs trop faibles car les irrégularités du papier augmentent les risques de claquage.

— On ne peut dépasser des tensions de service de 2 500 V car l'augmentation du nombre de feuilles de papier amène la formation de poches de gaz.

b) CONDENSATEURS AU PAPIER MÉTALLISÉ.

1. Bobinage.

Ils ne comportent qu'une seule couche de papier sur laquelle est vaporisé de l'aluminium ou du zinc sous vide. La couche homogène a une épaisseur comprise entre 0,5 et 0,8 microns. La feuille de papier doit être laquée au préalable au polystyrène ou à l'acétobutyrate de cellulose, pour obtenir une surface très lisse. Le bobinage ne nécessite que deux rouleaux (fig. 8-30).

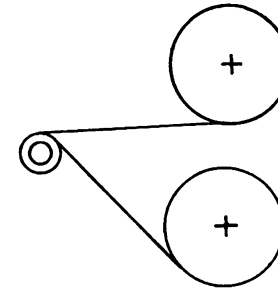


Fig. 8-30

Bobinage d'un condensateur au papier métallisé

2. Marges.

Les marges s'obtiennent en ôtant la métallisation aluminium sur la largeur désirée. Le papier passant entre des roulettes soumises à une certaine différence de potentiel, la métallisation est brûlée sans que le papier soit altéré.

Dans le cas de métallisation zinc on pose des réglettes de façon que le zinc ne se dépose pas aux endroits des marges.

3. Formation.

Lorsqu'un défaut conducteur n'a pas été masqué par la laque il s'établit un courant de court-circuit qui fond et vaporise le métal sans détruire le papier. Ces défauts sont éliminés à la fabrication par passage entre des rouleaux soumis à une différence de potentiel plus faible que pour l'établissement des marges. Les marges et la formation sont réalisées avant le bobinage.

4. Fixation des sorties.

La tranche est métallisée par projection au pistolet ou par évaporation cathodique de cuivre. Les fils de sortie sont soudés sur cette métallisation.

5. Imprégnation.

Elle se fait comme pour les condensateurs ordinaires au papier mais les produits utilisés (en général cires minérales : paraffine, ozokérite, cérésine) doivent être soigneusement choisis car certains se décomposent sous l'effet des étincelles d'auto-cicatrisation.

3° Protection.

L'humidité étant l'ennemie des condensateurs au papier, un soin tout particulier doit être apporté dans les procédés de protection.

a) MODÈLES « GRAND PUBLIC ».

Ils sont sous tube de carton bakélisé ou sous tube de verre obturés par de la cire. Certains sont protégés par un moulage Bakélite ou Rilsan (fig.

8-31 et 8-32), d'autres par un tube d'aluminium, les extrémités étant obturées par des disques en Bakélite ou en Néoprène (le Néoprène satisfaisant aux essais climatiques) (fig. 8-33).

Fig. 8-31

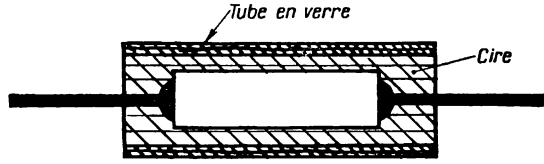


Fig. 8-32

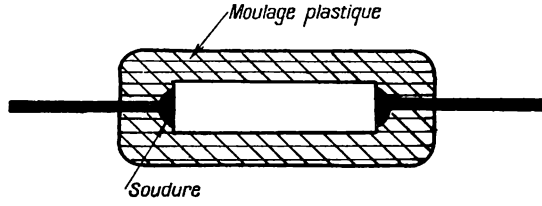


Fig. 8-33

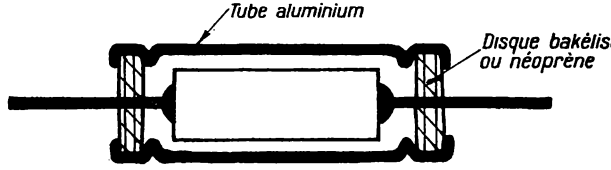


Fig. 8-34

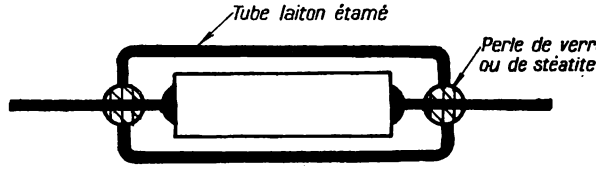
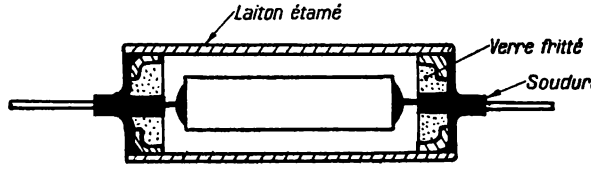


Fig. 8-35



Condensateurs au papier

b) MODÈLES PROFESSIONNELS.

Ils sont sous tube céramique, aluminium laiton étamé, avec des sorties par perles de verre ou de stéatite (les soudures métal verre s'effectuent par

chauffage HF) ou des sorties à travers du verre fritté (fig. 8-34 et 8-35).

Les condensateurs de modèle parallélépipédique sont enfermés dans des boîtiers en Bakélite ou laiton étamé avec des sorties par perles de verre ou de stéatite (fig. 8-36).

Pour la tropicalisation on les recouvre d'une peinture silicone et d'un vernis fongicide.

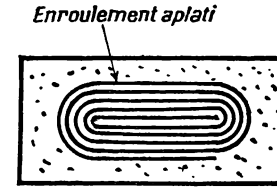


Fig. 8-36

Boîtier parallélépipédique

4° Différents modèles.

a) CONDENSATEURS ORDINAIRES AU PAPIER.

1. Imprégnation huile.

Ils sont robustes, résistent bien aux vibrations et sont surtout utilisés dans les applications d'électronique professionnelle pour les liaisons, couplages ou découplages. L'imprégnation à l'huile pyralène permet des applications telles que l'antiparasitage, l'éclairage par fluorescence ou la régulation de tension.

— modèles tubulaires :
fixation par les fils de sortie (fig. 8-37),
fixation par berceau (fig. 8-38),
fixation par embase (fig. 8-39),
fixation par vis (fig. 8-40) ;

— modèles parallélépipédiques :
sorties par cosses (fig. 8-41),
sorties par fils axiaux (fig. 8-42).

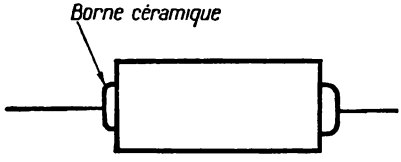


Fig. 8-37

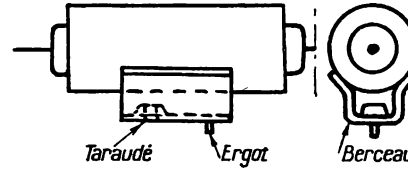


Fig. 8-38

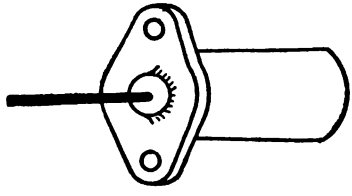


Fig.8-39

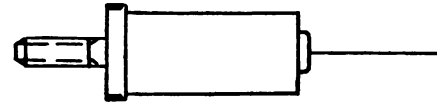


Fig. 8-40

Fixation des condensateurs au papier

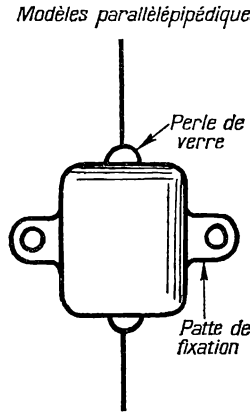


Fig. 8-42

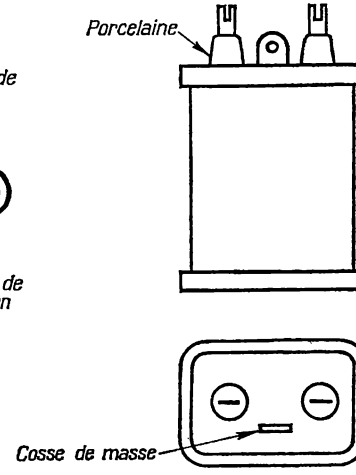


Fig. 8-41

2. Imprégnation cire.

Ce sont des condensateurs type « grand public » utilisés en radio et télévision.

— modèles tubulaires, sorties par fils axiaux ;
— modèles parallélépipédiques, sorties par bornes.

3. Imprégnation Araldite.

Ils ont un volume réduit et fonctionnent à température élevée. Ils ont été mis au point pour l'équipement de circuits exigeant une grande sécurité de fonctionnement en particulier dans les récepteurs de télévision ou pour l'antiparasitage ;

— modèles tubulaires, sorties par fils axiaux.

b) CONDENSATEURS AU PAPIER MÉTALLISÉ.

Ils présentent les caractéristiques générales des condensateurs classiques au papier avec toutefois des avantages particuliers :

— propriété d'auto-cicatrisation,
— faible encombrement (condensateurs miniatures),
— faible poids (le 1/4 d'un condensateur au papier),
— grande stabilité à la température.

L'auto-cicatrisation est un phénomène accidentel provoqué par un court-circuit dû à un défaut du diélectrique. Le claquage provoque la formation d'alumine isolante (ou d'oxyde de zinc) autour du défaut. C'est le même phénomène qui est utilisé pendant la fabrication (formation).

Leurs utilisations sont nombreuses partout où l'on a besoin d'une capacité importante sous un faible volume : électronique professionnelle, postes à transistors, téléphonie, antiparasitage des véhicules.

Le plus souvent ils sont tubulaires, quelquefois parallélépipédiques :

— sorties par fils axiaux, une sortie isolée (fig. 8-43);

— sorties par fils axiaux, deux sorties isolées (fig. 8-44);

— fixation par vis, une sortie isolée. Deux modèles (fig. 8-45 et 8-46);

— fixation par vis, deux sorties isolées. Trois modèles (fig. 8-47, 8-48, 8-49);

— sorties par fils radiaux (fig. 8-50).

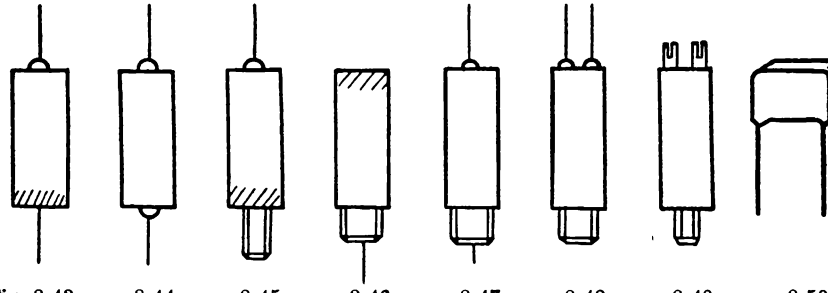


Fig. 8-43 8-44 8-45 8-46 8-47 8-48 8-49 8-50

Condensateurs au papier métallisé

c) CONDENSATEURS SUBMINIATURES AU PAPIER MÉTALLISÉ.

Ils ne comportent plus qu'une seule bande de papier. La démétallisation crée à la fabrication une marge en forme de créneaux dont le pas va croissant en fonction du diamètre qu'ils occuperont après bobinage. Les languettes métallisées se recouvrent alternativement pour former un condensateur très petit, non inductif. Ils sont employés avec succès en très haute fréquence par exemple pour le découplage des circuits en télévision (fig. 8-51).

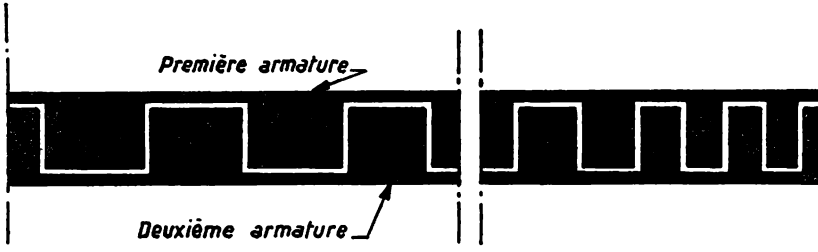


Fig. 8-51

Papier métallisé pour condensateur subminiature

5° Limites d'emploi.

a) CONDENSATEURS ORDINAIRES.

— C_n : de 4,7 nF à 4,7 µF (gamme courante).

— *Tol.* : ± 10 % ± 20 %.

— U_{nc}] : de 100 à 2 500 V.

— U_{ncc} : environ 20 % de U_{ncc} mais toujours inférieure à 350 V.

— *Isolement* : 5 000 MΩ $< R_i <$ 10^6 MΩ.
$R_i\, C_n \approx$ 10 000 S imprégnation huile.
$R_i\, C_n \approx$ 5 000 S imprégnation cire.

La résistance d'isolement diminue de 50 % quand la température augmente de 10 °C.

— *Plages de températures* : — 20 + 70 °C (grand public),
— 55 + 85 °C (ou + 100, + 125 °C en professionnel).

Réduire la tension maximale au-delà de + 85 °C.

— *Cœfficient de température* :
$\alpha = 300 \times 10^{-6}$/°C entre 0 et 85 °C.

— *Limites de fréquences* : les condensateurs bobinés ont une inductance comprise entre 0,006 µH et 0,01 µH par cm de long, y compris les connexions soit 0,01 µH à 0,05 µH pour un condensateur usuel d'où une fréquence de résonance f_0 qui satisfait à la relation

$$\frac{1}{\sqrt{C}} < f_0 < \frac{1{,}5}{\sqrt{C}} \quad (f_0 \text{ en MHz, C en } \mu\text{F})$$

On limite l'utilisation à 1 MHz car au-delà, les pertes deviennent trop élevées. De plus la tension alternative applicable diminue quand la fréquence augmente. Par exemple à 50 kHz elle doit être le dixième de celle utilisable à 50 Hz.

— *Stabilité* : elle est assez bonne (Δ C/C de 0,5 à 5 %).

— *Fiabilité* : elle est bonne si l'étanchéité est suffisante.

— *Utilisations* : condensateurs pour antiparasitage, correction de cos φ, démarrage de moteurs, découplage, flash électronique.

b) CONDENSATEURS AU PAPIER MÉTALLISÉ.

— C_n : de 4,7 nF à 47 µF (gamme courante).

— *Tol.* : ± 20 % ± 10 % (± 5 % sur demande).

— U_{ncc} : de 63 à 630 V. On adopte 20 V par micron d'épaisseur de papier. La tension d'essai est égale à 1,5 fois la tension de service.

— *Isolement* : 500 MΩ $< R_i <$ 500 000 MΩ $R_i\, C_n \approx$ 1 000 S.

— *Autres caractéristiques* : les mêmes que pour les condensateurs ordinaires.

— *Utilisations* : En audio-fréquences pour les circuits de liaison et de découplage. Ils doivent être **prohibés** pour :

- des tensions aux bornes inférieures à 10 V,
- des découplages sous faible tension (CAG, CAF, transistors),
- des circuits à constante de temps précise,
- des circuits fonctionnant en impulsions,
- des applications ne pouvant tolérer des court-circuits momentanés.

D) Condensateurs à film plastique.

1 Diélectique.

a) POLYSTYRÈNE (POLYSTYROL, STYROFLEX).

Résistivité : $\rho = 300\,000$ TΩcm.
Permittivité : $\varepsilon_r \approx 2{,}5$.
Facteur de pertes : $\operatorname{tg}\delta = 0{,}0002$ à 1 MHz.
Rigidité diélectrique : 100 à 1 000 kV/cm.

b) POLYESTER (MYLAR).

C'est un diélectrique synthétique du type polytéréphtalate d'éthylène.
Résistivité : $\rho > 1\,000$ TΩ à 100 °C.
Permittivité : $\varepsilon_r \approx 2{,}5$ à 1 MHz.
Facteur de pertes : $\operatorname{tg}\delta = 0{,}018$ à 1 MHz. Il diminue en dessous et au-dessus de cette fréquence.
Rigidité diélectrique : 100 kV/mm.

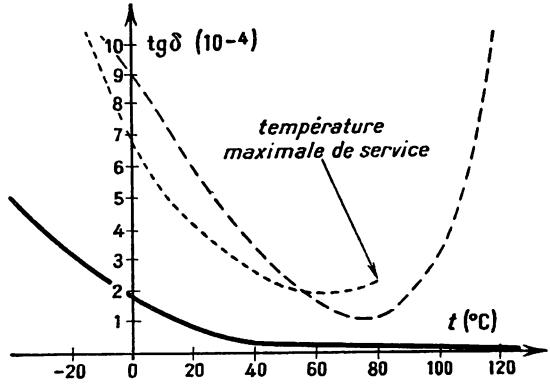


Fig. 8-52. — Tangeante δ

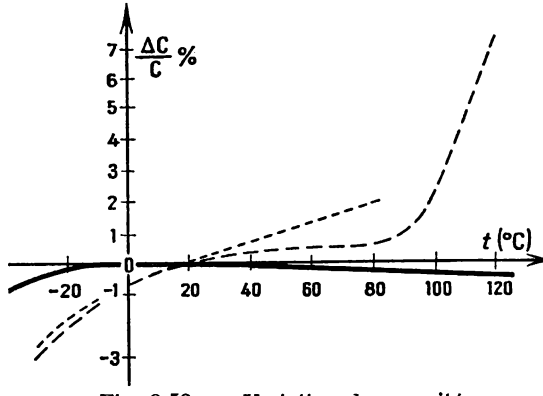


Fig. 8-53. — Variation de capacité

Condensateurs Polycarbonate ——— Condensateurs Polyester (Mylar) — — —
Condensateurs papier imprégné - - - - - -

c) POLYCARBONATE (MAKROFOL, LEXAN, MERLON).

Ce diélectrique récent permet de fabriquer des condensateurs pour équipements professionnels où la stabilité, la sécurité et le faible encombrement sont primordiaux.

Les courbes des figures 8-52 à 8-54 permettent de comparer les propriétés de ces condensateurs (dits « Filmstable ») par rapport à ceux au polyester et au papier.

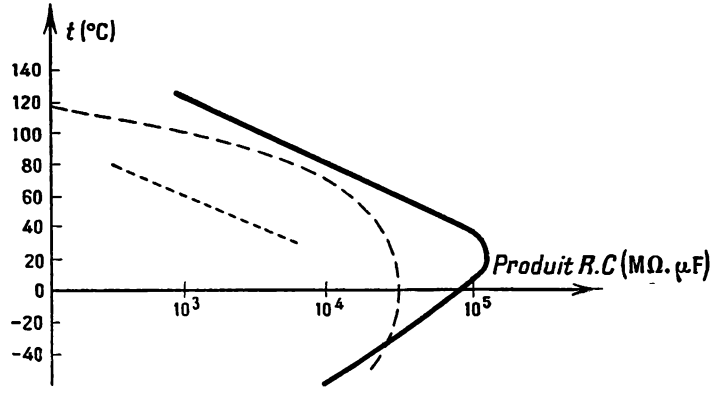


Fig. 8-54. — Résistance d'isolement

Condensateurs Polycarbonate ——— Condensateurs Polyester (Mylar) — — —
Condensateurs papier imprégné - - - - - -

d) POLYTÉTRAFLUOTÉTHYLÈNE (TÉFLON, PTFE).

Il donne les mêmes avantages que le polystyrène mais peut être utilisé jusqu'à 250 °C.

e) POLYPROPYLÈNE (MOPLEFAN).

Il permet de réaliser des condensateurs plus stables que le polystyrène et ayant une excellente tenue en température (170 °C).

f) FILM PLASTIQUE CHARGÉ DE CÉRAMIQUE (CERFEUIL).

Il donne des valeurs de capacité importante par unité de volume avec une bonne tenue en température (150 °C).

2° Fabrication.

Lorsque le bobinage du film et des armatures en aluminium est terminé le condensateur est chauffé. Le film se contracte, comprimant les électrodes, chassant ainsi les gaz emprisonnés. Les extrémités se trouvent scellées en même temps. Pour le matériel « grand public » ces condensateurs n'ont pas besoin d'être imprégnés, ni protégés.

Actuellement seuls les condensateurs au polyester sont métallisés.

3° Propriétés.

Les condensateurs métallisés possèdent aussi la propriété d'« autocicatrisation ». Leur encombrement est réduit et ils ont une tenue exceptionnelle à température élevée.

Les condensateurs au polystyrène ont une résistance d'isolement extrêmement grande qui leur permet de conserver leur charge électrique très longtemps.

Ils ont une très faible absorption diélectrique permettant des charges et des décharges très rapides sans détérioration.

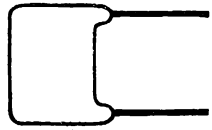


Fig. 8-55

Fig. 8-56

Condensateurs à film plastique pour circuits imprimés

Leur coefficient de température est négatif (sauf pour le polyester).

Leur grande résistance d'isolement leur permet de fonctionner dans des ambiances climatiques sévères.

4° Différents modèles.

— Plat à sorties radiales (fig. 8-55).

— Cylindrique à sorties unilatérales (fig. 8-56).

— Modèle « grand public » (fig. 8-57). Les deux sorties torsadées ont pour but de réduire l'inductance.

Fig. 8-57

Condensateur au polystyrène

5° Utilisations.

— Filtres RF, AF pour circuits imprimés ou devant supporter de hautes températures (polyester, polycarbonate).

— Appareils de mesure d'ionisation, de radioactivité, circuits de comptage de machines à calculer, circuits à grande constante de temps pour les condensateurs au polystyrène.

— Condensateurs au polyester, et au polycarbonate pour tous montages à températures élevées, à hautes performances : aéronautique, génie atomique, P.T.T....

6° Limites d'emploi.

TABLEAU 8-1

	Polystyrène	Polyester	Polycarbonate
Capacité nominale C_n ...	15 pF à 1 µF	1 nF à 5 µF	1 nF à 10 µF
Tolérances normales (%) .	± 10 ± 20	± 10 ± 20	± 20
— sur demande .	± 5 ± 2 ± 1	± 5 ± 3	± 10 ± 5 ± 3 ± 1
Tensions nominales U_{ncc} (V)	63 à 630	100 à 1 500	63 à 400
Coefficient de température (en millionièmes par °C)	— 100 à — 200	+ 200 à + 900	— 20 à — 100
Plages nominales de températures (°C)	— 40 à + 80	— 40 à + 125	— 55 à + 125
Résistance d'isolement à 20 °C sous 100 V (MΩ µF) ou secondes ..	10^6	5×10^4	10^5
Facteur de pertes tg δ à 1 kHz	5×10^{-4}	6×10^{-3}	$1{,}5 \times 10^{-3}$

— *Limite de fréquences* : les condensateurs au polystyrène sont préférables en HF car leurs pertes sont plus faibles.

La fréquence de résonance des condensateurs à film plastique se calcule comme celle des condensateurs au papier.

— *Stabilité* : $\Delta C/C < 0{,}5$ % (polystyrène). $\Delta C/C < 3$ % (polyester).

— *Fiabilité* : elle est bonne si la protection est suffisante.

E) Condensateurs à diélectrique verre.

1° Diélectrique.

Ce sont des verres spéciaux borosilicatés contenant des oxydes de plomb, potassium, baryum, de forte résistivité. Leur permittivité va de 4 à 8 et le facteur de pertes tg $\delta = 0{,}0005$ à 1 MHz.

2° Fabrication.

On effectue une métallisation sur chaque face de la lame de verre (fig. 8-58) ou bien on empile des feuilles d'aluminium entre des lames de verre (fig. 8-59). Après serrage et cuisson afin d'éliminer l'air entre les lames, on soude électriquement les fils de sortie (fer plaqué or ou nickel). L'ensemble est protégé par deux plaques de verre débordantes soudées par passage au four. Ce verre a un point de fusion inférieur à celui du diélectrique.

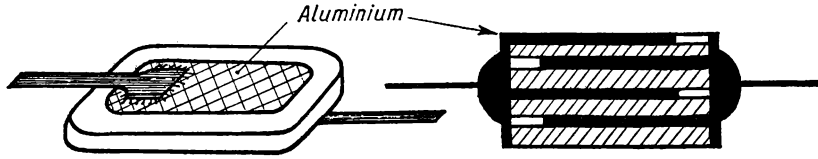


Fig. 8-58 Fig. 8-59

Condensateurs à diélectrique verre

3° Protection.

Les condensateurs sont enrobés dans des résines thermodurcissables ou dans du verre de même qualité ou encore placés sous boîtier céramique. Ces condensateurs satisfont aux essais de tropicalisation les plus sévères.

4° Limites d'emploi.

— C_n : de 1 pF à 10 nF.
— *Tol.* : ± 20 % ± 10 % ± 5 % ± 2 % ± 1 %.
— U_{ncc} : 300, 500 V.
— *Isolement* : $R_i\, C_n = 10^6$ S à 40 °C.
$R_i\, C_n = 10^4$ S à 80 °C.
— *Plage de température* : — 55 + 125 °C.
— *Cœfficient de température* ; $\alpha = + 120 \times 10^{-6}$/°C.
— *Fiabilité* : exceptionnelle.
— *Utilisations* : applications professionnelles en HF.

III. CONDENSATEURS ÉLECTROLYTIQUES.

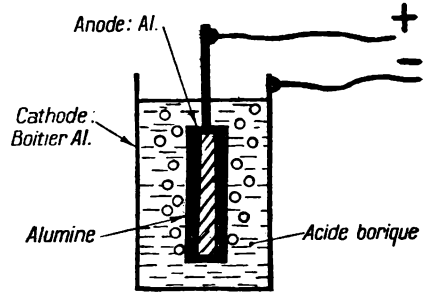


Fig. 8-60

Condensateur électrolytique : principe

A) Principe (fig. 8-60).

Les condensateurs électrolytiques secs (1) ou électrochimiques sont constitués de la façon suivante :

anode : Electrode centrale en aluminium,
cathode : Boîtier en aluminium,
électrolyte : Glycol et tétraborate d'ammonium,
diélectrique : Alumine.

Si l'on relie les électrodes à une source de courant continu un courant prend naissance qui électrolyse la solution. Des ions oxygène se dégagent à l'anode qui s'oxyde avec formation d'une couche d'alumine (Al_2O_3) qui forme le diélectrique. L'épaisseur formée est fonction de la tension de la source.

Cette opération s'appelle « la formation ». Lorsque l'alumine recouvre toute l'anode le courant de fuite diminue progressivement et devient faible.

Permittivité de l'alumine $\varepsilon_r = 9$.

Rigidité diélectrique 1 000 V/μ.

Facteur de pertes à 50 Hz : anode lisse : 2 à 6 %,
anode gravée BT : 5 à 25 %,
anode gravée HT : 2 à 10 %.

Lorsque la tension augmente, le courant de fuite augmente mais l'épaisseur d'alumine aussi pour pouvoir supporter cette nouvelle tension. Il se régénère pour des surtensions de 10 à 15 %. Un tel condensateur n'admet pas le courant alternatif puisqu'il est polarisé.

Les capacités obtenues vont de 1μF à 6 000 μF.

B) Différents types.

1° A électrodes d'aluminium.

a) FABRICATION.

Elle est analogue à celle des condensateurs au papier.

1. Anode. — Elle est constituée par une bande d'aluminium très pure recouverte au préalable d'une couche d'alumine.

2. Cathode. — Elle est constituée par une bande d'aluminium de même pureté que l'anode, plus mince et sans oxyde donc brillante alors que l'anode est terne.

3. Electrolyte. — C'est un mélange de glycol et de tétraborate d'ammonium qui imprègne de la gaze ou du papier spécial formant séparateur entre les deux électrodes.

(1) Les condensateurs électrolytiques liquides encombrants, compliqués, de faible durée de vie, ne sont plus fabriqués.

4. Formation de l'anode (fig. 8-61). — Les bandes d'aluminium sont entraînées par des rouleaux et sont oxydées par passage dans un bac contenant de l'électrolyte chauffé à 65 °C environ. La cuve est reliée au pôle négatif de l'alimentation. La tension de formation est réglée à 10 ou 20 % au-dessus de la tension de service prévue pour le condensateur.

5. Bobinage. — Les bandes séchées sont enroulées. Le bobinage s'effectue suivant le même principe que celui décrit pour les condensateurs au papier. Deux bandes de papier non imprégné sont intercalées entre les armatures.

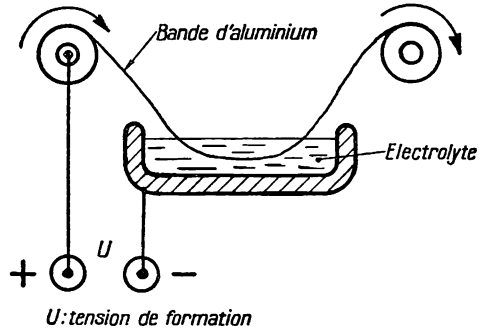


Fig. 8-61
Formation d'anode

6. Imprégnation. — L'imprégnation se fait après bobinage de façon que l'électrolyte pénètre uniformément dans toute la masse. Un orifice généralement prévu à la sortie d'anode doit permettre aux gaz de s'échapper surtout pendant le fonctionnement à des températures élevées afin d'éviter l'explosion.

b) Protection.

1. Type « grand public ». — Le condensateur est placé sous tube de carton bakélisé fermé aux deux extrémités par du brai ou de la cire (fig. 8-62) ou un couvercle (fig. 8-63). Dans les modèles plus soignés il est enfermé sous boîtier d'aluminium protégé par un tube de carton pour l'isoler de la masse lorsque le négatif ne doit pas lui être relié (fig. 8-64).

Un autre modèle sous tube d'aluminium se fait avec fixation par écrou sur le châssis (fig. 8-65).

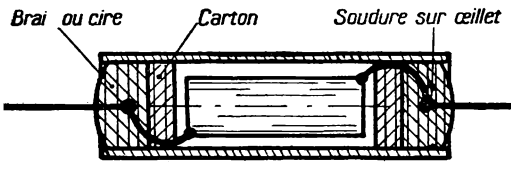


Fig. 8-62

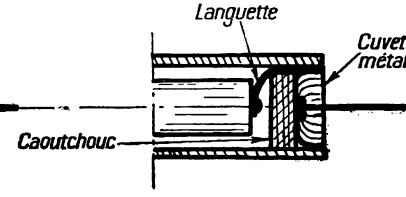


Fig. 8-63

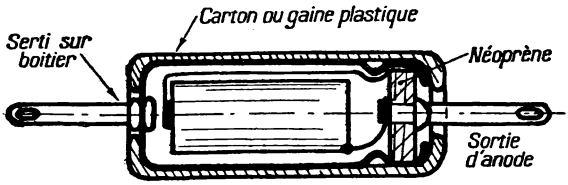


Fig. 8-64

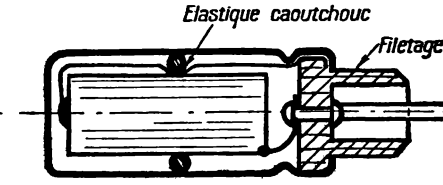


Fig. 8-65

Condensateurs électrolytiques

2. Type professionnel. — Les condensateurs professionnels pour filtrage ou retardement de relais sont protégés par des boîtiers parallélépipédiques en matière plastique moulée ou en aluminium.

c) DIFFÉRENTS MODÈLES.

Les différents modèles existent soit avec anode lisse soit avec anode gravée.

« L'anode lisse » a une épaisseur constante comprise entre 2 à 4 centièmes de mm. La résistance série est faible. Ils résistent bien aux températures extrêmes et seront choisis lorsqu'ils sont soumis à un service très dur (fig. 8-66).

Fig. 8-66. Anode lisse

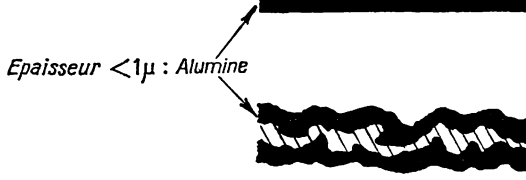


Fig. 8-67. Anode gravée

« Les anodes gravées » ont été imaginées pour réduire le volume tout en conservant des valeurs de capacités identiques. La bande est attaquée à l'acide puis lavée soigneusement et séchée. L'attaque ayant lieu dans toute l'épaisseur de la bande. La surface est augmentée d'environ 15 fois. L'alumine comblant en partie les creux, le gain en surface définitif est de 4 à 8 suivant la tension de service à obtenir (fig. 8-67).

Certains constructeurs obtiennent des surfaces élevées en vaporisant de l'aluminium sur un treillis en fil d'aluminium très fin.

1. Condensateurs pour radio-télévision.

- Modèles « grand public »,

  sous carton (fig. 8-68) ;
  sous tube d'aluminium protégé (fig. 8-69) ;
  sous boîtier d'aluminium, fixé par écrou (fig. 8-70) ou par culot octal;

modèles double (fig. 8-71). La cathode commune est enroulée entre les deux anodes. Capacités : 8 à 250 μF × 2.
modèles triple (100 - 100 - 50 μF) ou quadruple (100 - 50 μF × 3).

- Modèles professionnels (fig. 8-72). Ils sont sous tube d'aluminium ou de laiton étamé protégés par une peinture silicone plus un vernis fongicide.
- Modèles miniatures. Ils sont à anodes gravées et sont utilisés pour des tensions de service de 3 à 350 V (fig. 8-73).

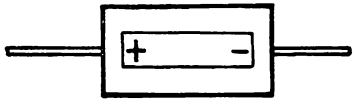


Fig. 8-68

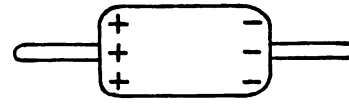


Fig. 8-69

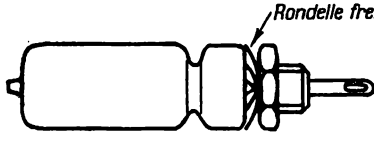


Fig. 8-70

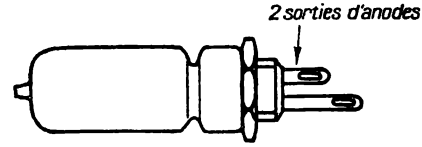


Fig. 8-71

Modèles grand public de condensateurs électrolytiques secs

- Modèles subminiatures. Ils sont aussi à anodes gravées mais utilisés sous des tensions plus faibles 3 à 35 V et trouvent de nombreuses applications dans les récepteurs portatifs, la prothèse auditive, les radio-sondes, le matériel militaire, etc...
- Modèles pour circuits imprimés (fig. 8-74).

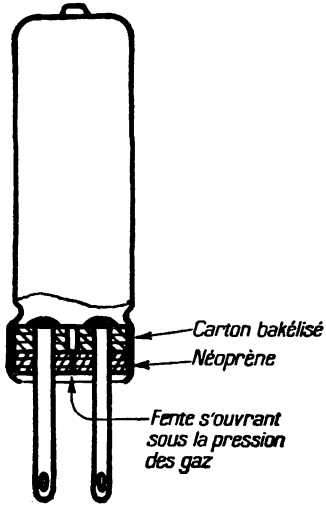


Fig. 8-72
C. électrolytique modèle professionnel

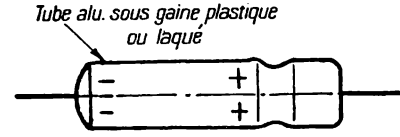


Fig. 8-73

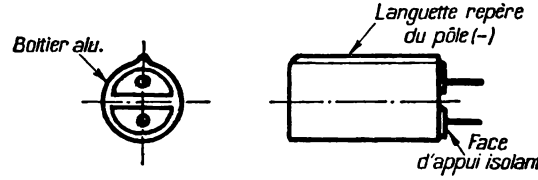


Fig. 8-74
C. électrolytiques : modèles miniatures

2. Condensateurs industriels.

● Condensateurs à usages généraux.

Ils sont utilisés comme étouffe-étincelles, pour le retardement de relais, pour le filtrage, comme accumulateurs d'énergie sur les machines à souder ou les appareils à magnétiser ou encore pour les flash électroniques.

Leur présentation se fait sous boîtier parallélépipédique en Bakélite (fig. 8-75) ou en aluminium (fig. 8-76).

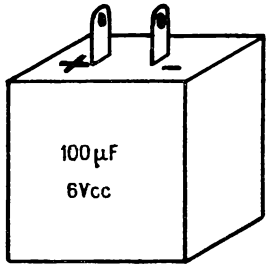


Fig. 8-75

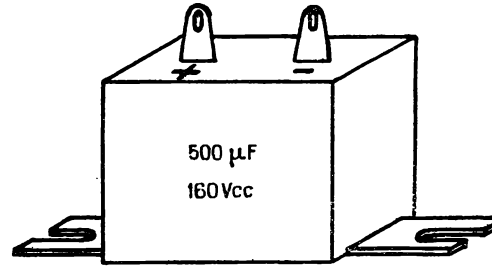


Fig. 8-76

Condensateurs électrolytiques en boîtier parallélépipédique

● Condensateurs pour démarrage de moteurs asynchrones monophasés. Ce sont des condensateurs pour courant alternatif « non polarisés » constitués par deux anodes lisses bobinées ensemble avec un séparateur imprégné

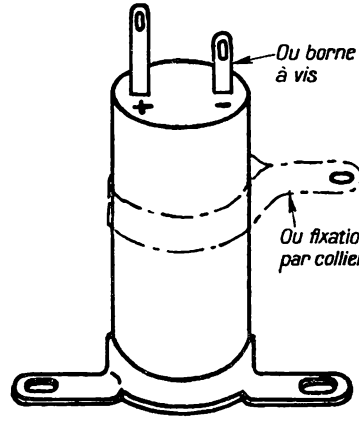


Fig. 8-77

Condensateur pour démarrage de moteurs

d'électrolyte normal. Cependant ils ne peuvent fonctionner en courant alternatif que pendant un temps très court à cause de l'échauffement nuisible (fig. 8-77).

3. Condensateurs pour grands écarts de températures (— 40 °C à + 85 °C).

Ils sont de types professionnel ou miniature sous tube de laiton étamé avec sorties céramique.

d) LIMITES D'EMPLOI.

1. Variation des pertes en fonction de la fréquence.

Les différentes pertes d'un condensateur électrolytique sont produites par :

— la conductibilité du diélectrique,
— l'effet Joule dans l'électrolyte,
— la décomposition de l'électrolyte,
— les imperfections du diélectrique.

Les pertes dans le diélectrique varient avec la fréquence et le graphique de la figure 8-78 montre que le facteur de pertes croît rapidement avec la fréquence ce qui limite l'emploi des condensateurs électrolytiques aux fréquences basses.

2. Variation du courant de fuites I_f en fonction de la tension de service.

La courbe de la figure 8-80 montre que I_f augmente très rapidement à partir de 550 V pour le condensateur choisi ce qui limite son emploi au-dessus de cette tension. Le courant de fuite I_f ne doit pas dépasser la valeur donnée par la relation suivante :

$$I_f < 0{,}01\ C_n\ U_n \quad (\text{ou } I_f < 100\ \mu\text{A})$$

I_f en μA, C_n en μF et U_n en V.

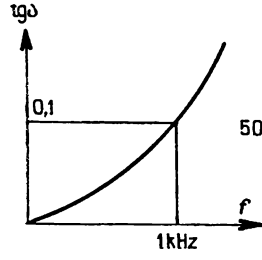


Fig. 8-78

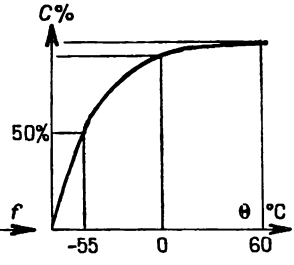


Fig. 8-79

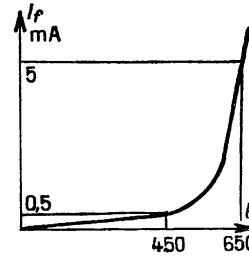


Fig. 8-80

Limites d'emploi des condensateurs électrolytiques

3. Variation de la capacité en fonction de la température.

La courbe de la figure 8-79 montre qu'à — 55 °C la capacité n'a plus que 50 % de sa valeur nominale. D'autre part au-dessus de 60 °C l'évapo-

ration de l'électrolyte devient trop grande et on ne peut appliquer la totalité de la tension de service (on doit se limiter à 75 %). Les condensateurs à anodes rugueuses tiennent moins bien aux températures extrêmes que ceux à anodes lisses.

A 70 °C le courant de fuite est dix fois plus élevé qu'à 20 °C.

4. Données numériques.

— C_n : de 1 à 1 000 μF (gamme courante). Jusqu'à 50 000 μF pour certains condensateurs industriels.

Valeurs normalisées pour U_{ncc} supérieure à 63 V :
8 16 32 50 100 250 500 1 000 μF.

Valeurs normalisées pour U_{ncc} inférieure à 63 V :
1 1,25 1,6 2 2,5 3,2 4 5 6,3 8 μF et les multiples jusqu'à 5 000 μF.

— *Tol.* : — 10 % + 150 % pour $U_s \leqslant 12$ V,
— 10 % + 100 % pour 25 V $\leqslant U_s \leqslant 50$ V,
— 10 % + 50 % pour $U_s \geqslant 150$ V.

— U_{ncc} :

Condensateurs normaux : 150 200 275 350 450 V.

Condensateurs miniatures : 2,5 4 6,3 10 12 16 25 40 63 V.

La somme de la tension en courant continu plus la tension de crête en courant alternatif ne doit pas dépasser U_{ncc}. Le pourcentage de la tension alternative par rapport à la tension continue ne doit pas dépasser 15 % pour la tension de service inférieure à 50 V et 10 % pour la tension de service supérieure à 50 V.

— *Plages de températures :* — 10 à + 70 °C, — 25 à + 70 °C, — 40 à + 85 °C.

— *Cœfficient de température :* entre — 20 °C et + 70 °C, α est compris entre 1 000 et 4 000 $\times$ 10^{-6}/°C.

— *Fiabilité :* elle est faible car sous des conditions normales d'utilisation, de température, d'humidité et de tension, la durée de vie n'excède pas 3 à 4 ans.

— *Stabilité :* elle est faible, $\Delta C/C$ de 5 à 20 %.

— Branchement de condensateurs électrolytiques en série (fig. 8-81). Lorsque $U_{ncc} > 350$ V ou que des pointes de tensions sont à craindre on shunte les deux condensateurs par des résistances ce qui permet une bonne

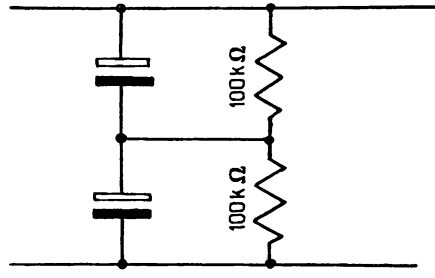


Fig. 8-81

répartition des tensions sur les condensateurs (les courants de fuite étant rarement égaux pour les deux condensateurs).

2° A électrodes de tantale.

a) PRINCIPE

Il est le même que celui des condensateurs électrolytiques à anode d'aluminium mais avec une anode de tantale. Le diélectrique est un film d'oxyde de tantale ($Ta_2 O_5$). La permittivité relative va de 11 à 13, ce qui permet de réaliser des condensateurs subminiatures dont le volume est pour une même valeur de capacité 50 % plus faible que pour un condensateur électrochimique à anode en aluminium gravée. Ce volume peut encore être réduit par l'emploi d'anode frittée.

b) FABRICATION.

1. Condensateurs bobinés.

Leur mode de fabrication est identique à celui des condensateurs électrolytiques à l'aluminium. L'épaisseur du diélectrique est proportionnelle à la tension de service. Elle est de l'ordre de 10^{-7} cm/V. L'électrolyte est à base de glycol. Les anodes ne sont pas gravées car leur surface est rugueuse naturellement.

2. Condensateurs à anode massive.

— L'anode est constituée par de la poudre de tantale comprimée sous vide à température élevée (frittage). Cette anode offre une surface réelle 50 fois plus importante que la surface d'un solide non poreux de mêmes dimensions.

— La cathode est constituée par le boîtier (fig. 8-82) et doit être en argent pour assurer un bon contact avec l'électrolyte et ne pas être attaquée par lui.

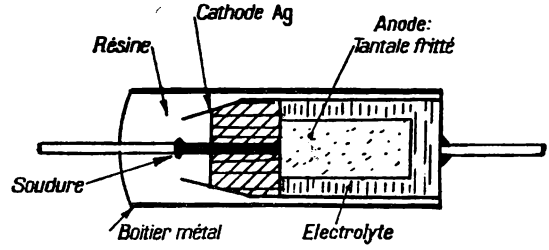


Fig. 8-82
Condensateur au Tantale

— L'électrolyte doit être suffisamment fluide pour bien pénétrer dans les pores de l'anode. On utilise une solution aqueuse de chlorure de lithium ou une solution d'acide sulfurique. Ils ne sont pas utilisés en matériel professionnel à cause des risques d'explosion et de fuite d'électrolyte.

— Les condensateurs à électrolyte solide sont constitués de poudre de tantale oxydée recouverte d'une couche solide semi-conductrice ($Mn\,O_2$ plus carbone colloïdal) puis argentés. Ils ont une excellente fiabilité (fig. 8-83).

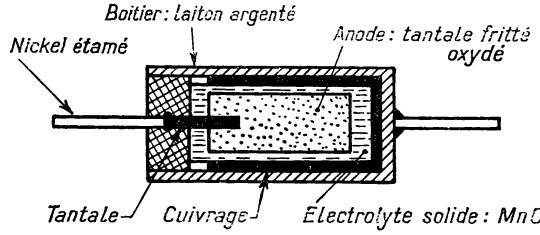


Fig. 8-83

Condensateur au tantale à électrolyte solide

3. Condensateurs spiralés.

Ils sont constitués par un fil de tantale lisse ou gravé enroulé en spirale et placé dans un boîtier en argent renfermant l'électrolyte.

c) PROTECTION.

Le boîtier en argent est serti sur un bouchon isolant. La protection est complétée par un manchon métallique dans lequel on coule une masse de résine qui assure d'autre part la protection de la soudure électrique du fil de connexion en nickel étamé et du fil de tantale d'anode. (Le tantale n'est pas soudable à l'étain). Le tout est recouvert d'un vernis à l'épreuve du brouillard salin ou protégé par une résine époxy.

d) DIFFÉRENTS MODÈLES.

1. Condensateurs bobinés.

2. Condensateurs à anode frittée. — Ils supportent des tensions plus faibles.

3. Condensateurs pour haute température. — Ils sont protégés par un boîtier en acier inoxydable.

4. Condensateurs non polarisés. — Ils sont constitués par deux anodes identiques en tantale montées en opposition à l'intérieur du même boîtier. Ils peuvent être utilisés sur courant alternatif.

5. Condensateurs pour micro-circuits. — L'anode est constituée par un simple fil.

e) LIMITES D'EMPLOI.

TABLEAU 8-2. — CONDENSATEURS AU TANTALE

Type	A électrolyte solide	Bobinés (à feuilles)	Spiralés (à fil)	A anode massive
Capacité nominale (µF)	0,1 à 330	0,5 à 160	0,025 à 4	4,7 à 470
Plage de température (°C)	— 80 + 125	— 60 + 60	— 60 + 55	— 55 + 85
Tension nominale (V)	6 à 50	3 à 70	3 à 70	6,3 à 75
Tolérances (%)	± 20 (± 10) et — 20 + 50	+ 50 — 10	+ 100 — 20 (+ 50 — 20 pour $C_n > 0{,}1$ µF)	— 15 + 50 ± 20
Courant de fuite (µA/µF/V) à 20 °C...	0,04	0,025	0,1	0,025
tg δ à 50 Hz	< 6 %	3 à 10 %	6 à 12	3 à 10 %

La capacité à — 55 °C est égale à 80 % de la capacité à 25 °C et à + 85 °C elle est égale à 105 % de la capacité à 25 °C ce qui démontre une grande stabilité en fonction de la température.

IV. APPLICATIONS.

Liaison HF ..... Mica à lamelles — Film plastique.
Céramiques pour transistors.

Découplage HF .... Papier — Film plastique — Céramiques groupe 2.

Liaison VHF ..... Mica argenté — Céramiques groupe 1 — Verre.
A gaz en émission.

Découplage VHF ... Mica argenté, céramiques.
Film plastique.

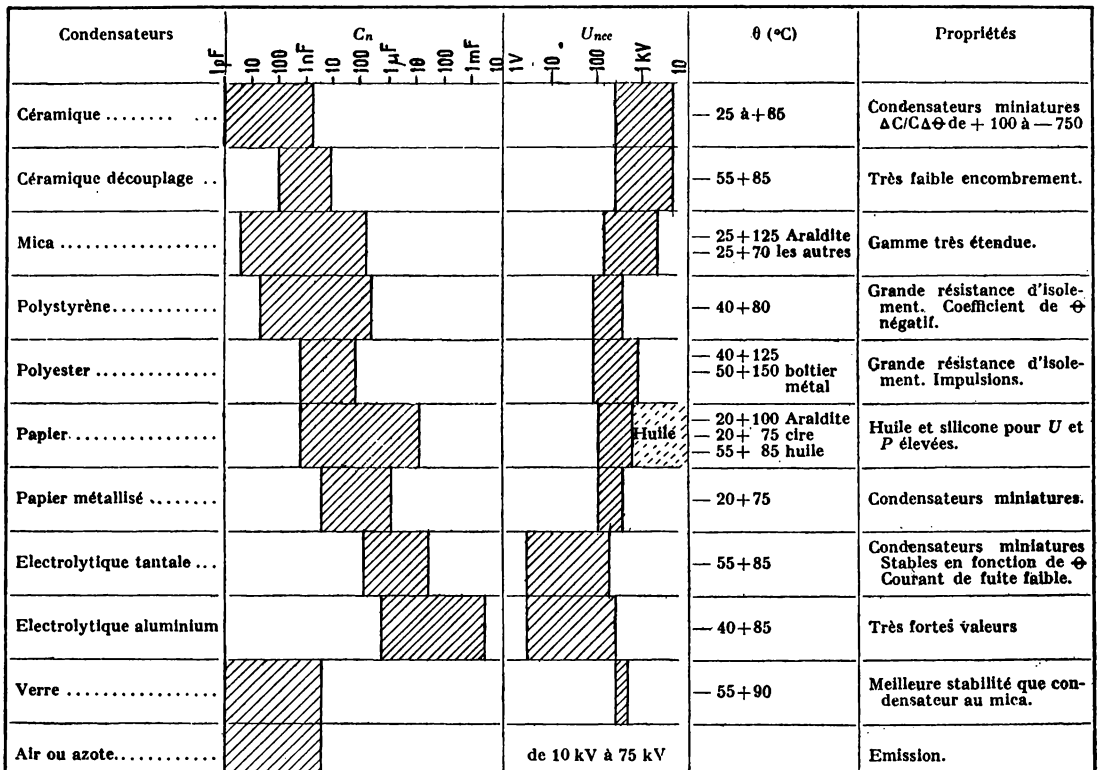
Liaison BF ..... Papier — Film plastique.
Electrolytiques tantale pour transistors.

Découplage BF .... *Sur cathode* : Electrochimique BT.
Sur anode, écran : Papier, électrochimique.

Filtrage réception..... Film plastique — Papier HT.
Electrochimiques aluminium ou tantale.

Filtrage émission ..... Huile ou Silicone.

TABLEAU 8-3. — LIMITES D'EMPLOIS DES CONDENSATEURS FIXES



Nota. — Les limites données sont des maximums et il y a lieu de consulter les fabricants pour les limites de leurs propres fabrications.

Antiparasitage cos φ..... Electrochimique au tantale. — Papier HT.
THT..... Film plastique — Papier HT — Céramiques.
Impulsions..... Film plastique.

D'après les fréquences :

Condensateurs au papier normaux ..... $f < 1$ MHz
Condensateurs au papier métallisé ..... $f < 100$ MHz
Condensateurs à film plastique, au mica, au verre $f < 10\,000$ MHz
Condensateurs céramiques groupe 1 ..... $1 \text{ MHz} < f < 5\,000 \text{ MHz}$
Condensateurs céramiques groupe 2 ..... $1 \text{ MHz} < f < 1\,000 \text{ MHz}$
Condensateurs électrolytiques .... $f < 10$ kHz

V. ESSAIS.

A) Classification.

Les essais qui sont du type statistique sont réalisés sur un certain nombre d'échantillons prélevés dans la production normale du fabricant. Le nombre d'échantillons dépend du type de condensateur et de l'essai réalisé.

1° Essais de qualification. — Ils sont destinés à mesurer ou vérifier l'ensemble des caractéristiques d'un type de condensateur et sont, en principe exécutés sur des condensateurs d'un modèle nouveau. On peut aussi les effectuer sur des pièces de fabrication courante pour vérifier la constance de leurs qualités.

2° Essais de réception. — Ils sont destinés au contrôle des condensateurs faisant partie d'une commande.

3° Différentes classes.

— Examens visuels. — Essais mécaniques.
— Essais électriques. — Essais climatiques.

B) Examens visuels.

— Dimensions. — Aspect. — Marquage.

C) Essais électriques.

— Capacité — Courant de fuite.
— Courant nominal — Dérive instantanée.
— Coefficient de température — Rigidité diélectrique.
— Dérive après cycle thermique — Résistance d'isolement.
— Tangente de l'angle de pertes — Fréquence de résonance.

D) Essais climatiques.

— Froid sec — Basse pression atmosphérique.
— Chaleur humide (accélérée) — Chaleur humide (longue durée).

— Variations rapides de température.
— Essai cyclique combiné — Brouillard salin.
— Stockage à basse température.
— Etanchéité.

E) Essais mécaniques.

— Chocs répétés — Vibrations.
— Robustesse des sorties — Soudure.
— Vieillissement accéléré.

Nota. — Le nombre et le type des essais subis sont variables suivant les types et catégories de condensateurs.

VI. MARQUAGE. D'après normes U.T.E. et C.C.T.

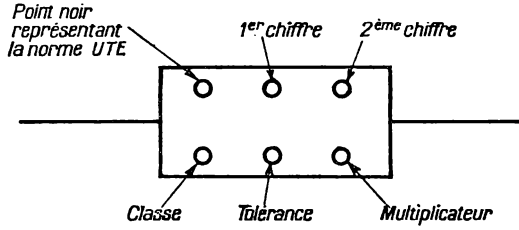


Fig. 8-84

I. Condensateurs au mica : en clair ou en code (fig. 8-84).

II. Condensateurs céramique : en clair ou en code suivant le modèle et la classe (fig. 8-85 à 8-89). En cas de place insuffisante le cinquième point (tolérance) peut être placé sur la génératrice opposée aux quatre autres points.

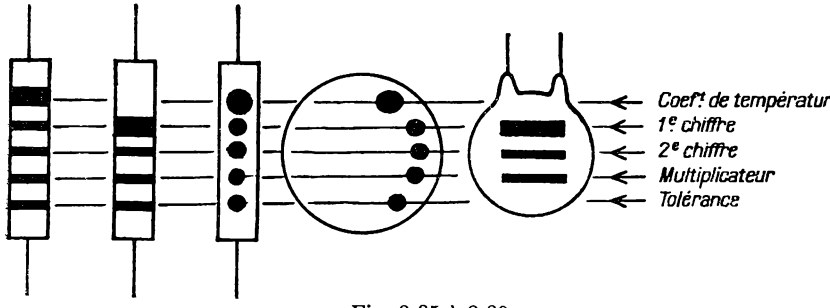


Fig. 8-85 à 8-89

Marquage des condensateurs

Nota : en cas de manque de place le cinquième point (tolérance) peut être placé sur la génératrice opposée à celle portant les quatre autres points.

III. Condensateurs au papier ou à film plastique. Généralement en clair ou un des marquages ci-dessus suivant les modèles.

IV. Condensateurs électrochimiques : En clair.

TABLEAU 8-4. — Code des couleurs

	Noir	Brun	Rouge	Orange	Jaune	Vert	Bleu	Violet	Gris	Blanc	Or	Argent
1er et 2e chiffres...	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Multiplicateur	1	10	10^2	10^3	10^4							
Tolérance (%)	20	1	2						0,5		5	10
Classe		1		2		3				4		
Coeff. de temp.....	0	—33	—75	—150	—220	—330	—470	—750			+100	

VII. NORMES.

UTE 93-110. Condensateurs électrolytiques à électrodes en aluminium (1957).
UTE 93-115. Condensateurs miniatures pour tensions inférieures à 63 V.
UTE C 93-120. Condensateurs à diélectrique mica (1958).
UTE C 93-130. Condensateurs à diélectrique céramique (1959).
UTE C 93-140. Condensateurs au papier (1959).
CCT 02-01. Condensateurs à diélectrique mica (1957).
CCT 02-02. Condensateurs à diélectrique céramique à coefficient de température défini (1957).
CCT 02-03. Condensateurs au papier imprégné (1962).
CCT 02-04. Condensateurs à diélectrique à coefficient de température non défini (1959).
CCT 02-05. Condensateurs pour antiparasitage (1962).
CCT 02-06. Condensateurs électrochimiques au tantale (1959).
CCT 02-07. Condensateurs à diélectrique polytéréphtalate d'éthylène (1961).
CCT 02-09. Condensateurs « bouton » à diélectrique mica (1961).
CCT 02-12. Condensateurs au tantale à électrolyte solide (1961).
FNIE 023. Condensateurs électrolytiques à électrodes en aluminium. Caractéristiques (1961).
FNIE 024. Condensateur électrolytique à électrodes en aluminium miniatures pour tensions inférieures à 63 V. Règles (1961).
FNIE 025. Condensateurs électrolytiques à électrodes en aluminium, miniatures pour tensions inférieures à 63 V. Caractéristiques (1961).

FNIE 026. Condensateurs à diélectrique plastique. Condensateurs au polyester (1961).

FNIE 027. Condensateurs à diélectrique plastique. Condensateurs au polystyrène (1961).

FNIE 028. Condensateurs à diélectrique céramique du type I. Caractéristiques (1961).

FNIE 029. Condensateurs à diélectrique céramique du type II. Caractéristiques (1961).

CHAPITRE 9

LES TUBES ÉLECTRONIQUES

I. GÉNÉRALITÉS.

A) Définitions.

1° Tube électronique. — Dispositif électronique dans lequel la conduction se manifeste dans le vide ou dans un milieu gazeux à l'intérieur d'une enceinte étanche aux gaz.

2° Cathode. — Electrode qui constitue la source primaire d'émission électronique.

3° Grille. — Electrode présentant une ou plusieurs ouvertures pour le passage des électrons, ou des ions.

4° Anode. — Electrode dont la fonction est de capter les électrons en vue de leur utilisation dans un circuit extérieur.

5° Plaque. — Nom communément donné à l'anode d'un tube électronique.

6° Ampoule, Enveloppe. — Enceinte, étanche aux gaz, qui renferme les électrodes.

7° Pied, Embase. — Partie de l'ampoule destinée à supporter des électrodes et traversée par les connexions correspondantes.

8° Culot. — Partie rapportée sur l'ampoule portant les broches ou contacts destinés à assurer la liaison des électrodes, avec le circuit extérieur et qui s'engagent dans le support du tube.

B) Terminologie.

1° Résistance interne ou résistance d'anode : C'est le quotient de la composante sinusoïdale de la tension d'anode par la composante sinusoï-

dale correspondante du courant d'anode, toutes les autres électrodes étant maintenues à des potentiels constants.

$$\rho = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a}, \text{ en ohms.}$$

2° Pente ou transconductance grille de commande : Anode : c'est le quotient de la composante sinusoïdale du courant d'anode par la composante sinusoïdale de la grille de commande, les tensions de toutes les autres électrodes restant invariables.

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta V_g}, \text{ en mA/V.}$$

3° Facteur d'amplification : Rapport en valeurs absolues de la variation de tension de l'anode à la variation de tension de la grille de commande, le courant anodique restant invariable.

$$K = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_g}.$$

4° Tension de chauffage : Tension appliquée aux bornes du filament chauffant (V_f).

5° Courant de chauffage : Courant fourni dans le but de chauffer la cathode (I_f).

6° Tension d'anode : Tension continue et constante appliquée dans le circuit de l'anode (V_a).

7° Courant d'anode (direct) : Courant continu d'anode circulant dans le sens correspondant au flux électronique émis par la cathode (I_a).

8° Tension de grille : Tension de polarisation continue et constante appliquée dans le circuit de la grille de commande (V_g) ou dans le circuit de la grille écran (V_e).

9° Courant de grille : Courant de grille écran (I_e).

10° Puissance de sortie : Puissance utile fournie au circuit d'utilisation.

11° Dissipation d'électrode : Puissance dissipée sous forme de chaleur dans une électrode soit du fait d'un bombardement électronique ou ionique, soit par le rayonnement d'autres électrodes.

12° Tension inverse de pointe : Tension instantanée maximum dans le sens opposé à celui de la tension directe.

13° Courant de pointe max.: valeur instantanée du courant qu'on ne doit pas dépasser.

14° Capacité d'électrode : Capacité d'une électrode par rapport à toutes les autres électrodes reliées ensemble.

15° Capacité interélectrode : Capacité directe entre deux électrodes, à l'exclusion de toute capacité entre ces électrodes et d'autres électrodes ou corps voisins.

16° Impédance effective d'entrée (ou de sortie) : Quotient de la composante sinusoïdale de la tension de commande (ou de sortie) par la composante sinusoïdale correspondante du courant, compte tenu des réactions des autres électrodes reliées à leur circuit dans des conditions déterminées.

17° Caractéristique d'électrode : Courbe généralement obtenue par voie expérimentale qui exprime la relation entre le courant et la tension d'une électrode, les tensions de toutes les autres électrodes restant invariables.

18° Caractéristique mutuelle de deux électrodes : Courbe généralement obtenue par voie expérimentale qui exprime la relation entre le courant d'une électrode et la tension d'une autre électrode, toutes les tensions des autres électrodes restant invariables.

19° Caractéristique statique : Caractéristique à impédance de charge nulle et pour une fréquence nulle ou faible.

20° Caractéristique dynamique : Caractéristique en régime alternatif à impédance de charge non nulle.

Nota. — Les caractéristiques à considérer sont variables suivant les types de tubes.

Les définitions ci-dessus sont extraites de la norme C 01-007 : vocabulaire électronique.

C) Identification.

1° Le type.

Il est caractérisé par le domaine d'utilisations. Les principaux types sont :

- tubes de réception,
- tubes d'émission,
- tubes pour hyperfréquences,
- tubes industriels à gaz,
- tubes cathodiques,
- cinescopes,
- cellules photoélectriques,
- tubes pour énergie nucléaire.

2° Le modèle.

Il est caractérisé par le culot utilisé et par la construction générale extérieure.

a) DIFFÉRENTES SORTES DE CULOTS :

1. Européen : 4 à 9 broches genre « fiches bananes ». N'est plus utilisé.

2. Américain : 4 à 7 broches dont deux plus grosses. N'est plus utilisé.

3. Locktal : 8 broches miniatures avec ergot de centrage métallique sur téton central. Peu utilisé.

4. Octal : 8 broches régulièrement espacées de diamètre 3 mm avec ergot de centrage sur téton central en Bakélite. Fabrication en série dépannage seulement (fig. 9-1).

5. Transcontinental : 4 plots espacés de 30° plus 4 plots espacés de 54°. Fabrication en série dépannage seulement (fig. 9-2). La sortie de grille de commande se fait par une corne au sommet de l'ampoule (1).

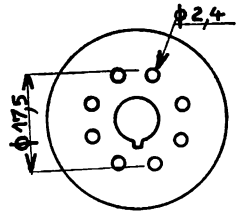


Fig. 9-1
Octal

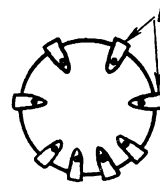


Fig. 9-2
Transcontinental

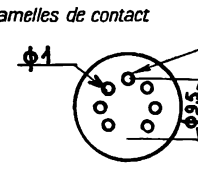


Fig. 9-3
Miniature 7 broches

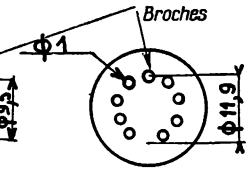


Fig. 9-4
Noval 9 broches

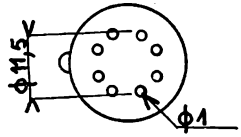


Fig. 9-5
Rimlock médium

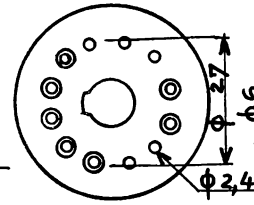


Fig. 9-6
Duodécal

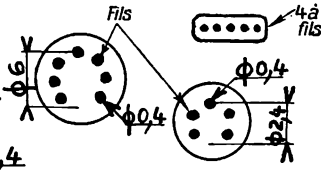


Fig. 7 à 9
Subminiatures

6. Rimlock ou médium : 8 broches de 1 mm de diamètre espacées régulièrement. Positionnement par ergot latéral (fig. 9-5).

7. Noval : 9 broches miniatures de diamètre 1 mm. Le positionnement est obtenu par deux broches ayant un espacement double des autres (fig. 9-4). Le culot « magnoval » 9 broches est un agrandissement de l'embase « noval ».

8. Miniature : 7 broches miniatures de diamètre 1 mm. Le positionnement est obtenu par deux broches ayant un espacement double des autres (fig. 9-3).

(1) Les culots « octal » et « transcontinenta » sont utilisés sur des tubes professionnels (tubes cathodiques, tubes à gaz...).

9. Décal : 10 broches miniatures réparties sur un cercle dont le diamètre est identique à celui de la série « noval ».

10. Duodécal : 12 broches régulièrement espacées. Positionnement par ergot sur téton central. Utilisé sur cinescopes ou tubes cathodiques (fig 9-6).

11. Subminiatures : Sorties par fils pouvant être soudés directement sur les circuits. Utilisés sur appareils légers, portatifs (fig. 9-7 à 9).

12. Spéciaux : Pour tubes d'émission, ou professionnels (Magnal 11 broches, Diheptal 14 broches, Jumbo 4 broches, Américain géant 5 broches, Pee Wee 3 ou 4 broches...).

b) Aspect extérieur.

Il dépend du matériau utilisé pour la fabrication de l'enveloppe. Elle peut être tout verre, tout acier ou mixte métal-verre.

3° La catégorie.

Elle dépend de la qualité des matériaux utilisés et de la précision dans la construction. On distingue :

a) Les tubes électroniques pour matériel « grand public ».

b) Les tubes électroniques pour matériel professionnel :

- tubes à caractéristiques spéciales,
- tubes à usages particuliers,
- tubes renforcés, résistant aux chocs et aux vibrations,
- tubes de sécurité (5 étoiles) pouvant supporter des conditions d'utilisation très dures : allumages et extinctions très nombreux, résistance aux fortes accélérations, aux vibrations, etc...

4° La tension et le mode de chauffage (voir « code des tubes »).

5° Le nombre d'électrodes.

Les appellations des tubes comportant de 2 à 9 électrodes sont les suivantes : diode, triode, tétrode, pentode, hexode, heptode, octode, nonode. La même enveloppe peut contenir plusieurs groupes d'électrodes : diode-triode, triode-hexode, double diode-triode...

Nota. — Les désignations correspondantes aux culots, à l'aspect extérieur, au mode de chauffage seront examinées dans le paragraphe « code des tubes ».

II. LES CATHODES.

A) Les matériaux.

Les qualités requises pour le choix du matériau sont :

— le pouvoir émissif élevé,
— la faible tension de vapeur à la température de fonctionnement,
— la résistance mécanique élevée à chaud,
— la durée de vie suffisante,
— la résistance au bombardement par les ions positifs.

Les matériaux possédant ces qualités sont en nombre restreint parmi lesquels on trouve des métaux purs utilisés à cause de leur robustesse dans les tubes d'émission de grande puissance et des matériaux complexes réservés pour les tubes de petite puissance car ils nécessitent une faible énergie de chauffage.

1° Tungstène.

Température d'émission : 2 200 à 2 400 °C.
Travail d'extraction du métal : 4,52 eV.
Rendement d'émission : 0,005 A/W.
Courant de saturation : 1 A/cm².

— **Applications :** Tubes d'émission d'une puissance dépassant 10 kW.

— **Durée de vie :** 1 000 à 1 500 heures.

2° Tungstène thorié.

— Température d'émission : 1 500 à 1 700 °C.
— Travail d'extraction du métal : 2,6 eV.
— Rendement d'émission : 0,07 A/W.
— Courant de saturation : 2 A/cm².

— **Applications :** Tubes d'émission de moyenne puissance (0,5 kW à 10 kW).

— **Durée de vie :** Plus de 10 000 heures.

3° Oxydes de baryum et strontium.

— Température d'émission : 650 à 850 °C.
— Travail d'extraction du métal : 1 eV.
— Rendement d'émission : 0,2 A/W.
— Courant de saturation : 0,5 A/cm².

— **Applications :** Tubes de petite puissance et faible tension. Les cathodes à oxydes ne peuvent pas être utilisées au-dessus de 1 500 V car elles sont très sensibles au bombardement ionique

— **Durée de vie :** 500 à 5 000 heures pour les tubes de matériel « amateur » chauffés entre 700 et 800 °C. Les tubes de sécurité chauffés entre 650 et 700 °C ont une durée de vie supérieure à 5 000 heures.

4° Tungstène-baryum utilisé dans les cathodes à diffusion.

— Température d'émission : 1 000 à 1 200 °C,
— Travail d'extraction du métal : 1,8 eV,
— Rendement d'émission : 10 A/W,
— Courant de saturation : 100 à 300 A/cm² en régime d'impulsions.

— **Applications :** Tubes pour hyperfréquences.

B) Différents types.

1° Cathodes en métaux purs.

En émission pour des puissances dépassant 10 kW on utilise des fils en tungstène pur de gros diamètre à chauffage direct.

En hyperfréquences certains klystrons de grande puissance sont réalisés avec des cathodes en tantale en forme de coupelles.

2° Cathodes à couche rapportée.

a) CATHODES A CHAUFFAGE DIRECT.

1. Cathodes pour tubes à vide. — Elles sont constituées par des fils cylindriques ou des rubans recouverts d'oxydes. Les filaments émissifs sont pliés en V simple ou double et maintenus tendus par des lamelles élastiques à température élevée (molybdène, acier inoxydable) (fig. 9-10 et 9-11).

Le métal utilisé doit avoir une résistivité élevée et une résistance à chaud suffisante. On utilise du nickel actif pour les fortes intensités ou des alliages nickel-cobalt pour les faibles intensités (Hilo N-CKT 18, Hilanic N-KT 20, Cobanic N-KFe 45).

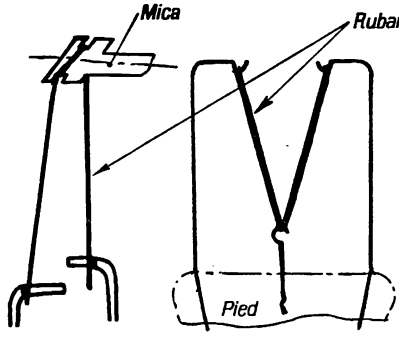


Fig. 9-10 Fig. 9-11

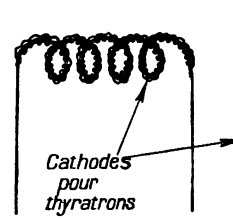


Fig. 9-12

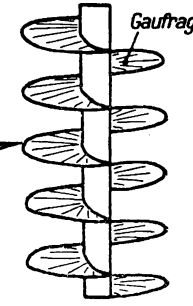


Fig. 9-13

Cathodes à chauffage direct

Du fait de leur inertie thermique faible ces filaments ne peuvent être chauffés dans les conditions normales en courant alternatif. Ils sont donc chauffés en courant continu et sont utilisés dans les appareils portatifs alimentés par piles. Leur efficacité thermo-électronique est plus élevée que celle des cathodes à chauffage indirect car les pertes calorifiques sont plus faibles.

2. Cathodes pour phanotrons et thyratrons. — Elles sont construites pour permettre de grands débits.

Elles comportent un filament de tungstène en hélice sur lequel est boudiné un fil en nickel qui supporte l'oxyde. Le double « spiralage » donne une surface émissive importante et un rendement thermique élevé (fig. 9-12).

Un autre modèle est constitué par un ruban ondulé, enroulé en hélice sur lequel est déposé l'oxyde (fig. 9-13).

b) CATHODES A CHAUFFAGE INDIRECT.

1. Filament chauffant. — Il est constitué par un fil de tungstène de 6 à 50 microns ou d'alliage Mo-W20 moins cher recouvert d'alumine qui a pour but de l'isoler de la cathode. Les formes les plus courantes sont :

— Le filament plié « en botte » ou « fagot » : Les plis ne sont pas réalisés à la même hauteur pour éviter les court-circuits à l'endroit des pliages qui se dénudent. Leur longévité est médiocre mais leur fabrication est facile (fig. 9-14).

— Le filament en hélice simple : La couche isolante ne recouvre que l'extérieur ce qui permet pour un même volume d'avoir un fil plus gros par rapport au type précédent d'où une longévité plus grande (fig. 9-15).

— Le filament bihélicoïdal (bispiralé) : Il est formé de deux hélices superposées permettant l'annulation du champ magnétique. Le ronflement parasite étant éliminé on les utilise dans les tubes amplificateurs à faible niveau de bruit (fig. 9-16).

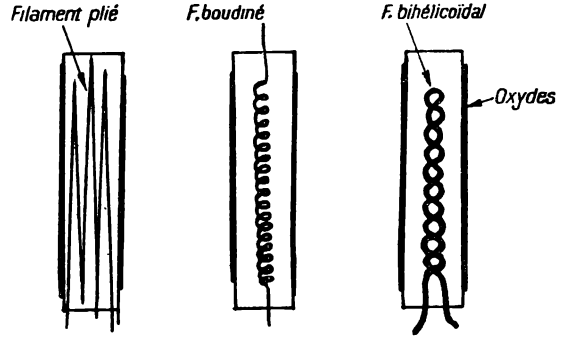


Fig. 9-14 Fig. 9-15 Fig. 9-16

Filaments de tubes à chauffage indirect

2. Cathode. — Elle est constituée par un tube de nickel passif (nickel-ballast) comportant une faible quantité d'éléments réducteurs (magnésium, silicium). La couche émissive formée d'oxydes alcalino-terreux (BaO, SrO, CaO) est déposée sur le tube qui peut avoir les formes suivantes :

— cathode à section circulaire (fig. 9-17) pour tubes à caractéristiques normales ;

— cathode à section ovale (fig. 9-18) pour tubes de puissance ;

— cathode à section rectangulaire (fig. 9-19) pour tubes à caractéristiques poussées. Leur forme permet de mieux définir la distance grille-cathode.

— cathode pour tubes cathodiques (fig. 9-20). Ici l'oxyde est déposé sur le fond du cylindre ;

— cathodes pour thyratrons ou phanotrons.

Le chauffage des tubes à gaz se fait sous une tension plus faible que pour les tubes à vide afin d'éviter l'amorçage d'arc entre les extrémités du filament.

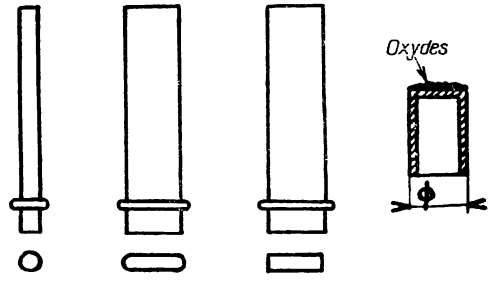


Fig. 9-17 Fig. 9-18 Fig. 9-19 Fig. 9-20

Cathodes de tubes à vide

Par contre l'intensité de chauffage va de quelques ampères pour les petits tubes à 100 ampères pour les plus puissants. On entoure la cathode d'écrans thermiques pour éviter les pertes par rayonnement (fig. 9-21). Les électrons sortent par la partie supérieure. Une telle cathode ne pourrait pas être utilisée pour les tubes à vide car la charge d'espace empêcherait la plupart des électrons de sortir par les alvéoles. Dans un tube à gaz l'ionisation supprime la charge d'espace et les électrons sortent sans difficulté :

— cathodes pour tubes hyperfréquences.

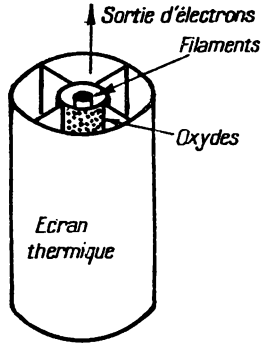


Fig. 9-21

Cathode à chauffage indirect pour thyratron

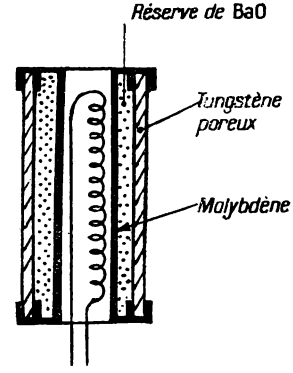


Fig. 9-22

Cathode L

La couche émissive est le plus souvent constituée par de la thorine (ThO_2) qui permet une forte densité d'émission.

3° Cathodes à réserve.

a) CATHODES EN TUNGSTÈNE THORIÉ.

On incorpore au tungstène en poudre 1,5 % de thorine. Le tungstène réduit partiellement la thorine et le thorium diffuse en surface. Un traitement de carburation améliore la réduction de la thorine et la diffusion en surface en cours de fonctionnement.

Ce sont des cathodes à chauffage direct utilisées pour les tubes d'émission de moyenne puissance (0,5 kW à 10 kW).

b) CATHODES COMPENSÉES OU A DIFFUSION OU CATHODES L (du nom de l'inventeur : Lemmens).

Elles possèdent une réserve de carbonates de baryum et strontium dans un tube en tungstène poreux (fig. 9-22). L'ensemble est maintenu par des cloisons en molybdène. A température élevée il se produit de l'oxyde qui diffuse en surface à travers le tungstène.

Leurs principaux avantages sont :

— Emission supérieure avantageuse en régime d'impulsions.
— Plus grande résistance au bombardement ionique.
— Fonctionnement dans un intervalle de température plus étendu (900 °C à 1 350 °C).

Les cathodes L sont utilisées en hyperfréquences. Elles sont d'un emploi délicat dans les tubes électroniques à grille négative car elles émettent par évaporation de grandes quantités de baryum qui peuvent provoquer une émission de grille.

c) CATHODES IMPRÉGNÉES.

Elles sont constituées par des tiges de tungstène poreuses obtenues par frittage.

Elles sont imprégnées par trempage d'aluminate de baryum. Leurs propriétés sont analogues à celles des cathodes compensées.

4° Cathodes froides.

a) CATHODES MÉTALLIQUES.

Elles sont constituées par un cylindre ou un fil hélicoïdal en nickel ou en molybdène parfois recouvert d'oxydes et sont utilisées principalement dans les tubes régulateurs de tension (fig. 9-23 et 9-24), les tubes pour éclairage par fluorescence, les lampes « flash ». L'amorçage est dû à l'émission d'électrons par champ électrique. Pendant le fonctionnement les électrons sont extraits par bombardement ionique.

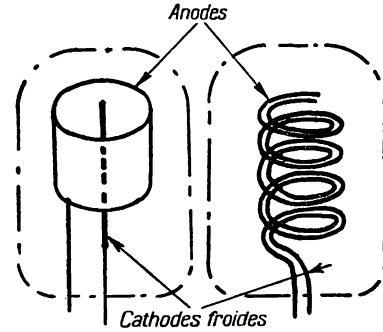


Fig. 9-23 Fig. 9-24

b) CATHODES DE MERCURE.

Elles sont constituées par un bain de mercure. L'émission électronique se fait par champ électrique. On les utilise dans des redresseurs industriels (mutateur, excitron, ignitron) qui sont des tubes à gaz fonctionnant en régime d'arc (fig. 9-25).

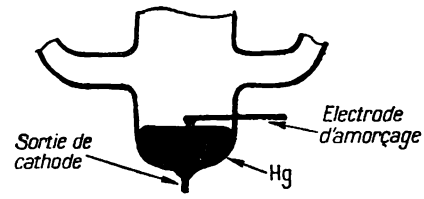


Fig. 9-25

Cathode à mercure

c) PHOTOCATHODES.

Les électrons sont extraits par irradiation lumineuse. Elles sont utilisées dans les tubes photoélectriques.

C) Fabrication.

1° Filaments chauffants.

Les fils fins en tungstène sont obtenus par tréfilage au moyen de filières de diamètres décroissants. Pour les faibles diamètres le tréfilage est suivi d'un polissage électrolytique qui les amène à la valeur désirable.

Les filaments pliés « en bottes » sont recouverts au trempé par plusieurs passages dans un bain d'alumine. Après séchage le fil est enroulé sur un mandrin qui amorce les plis. Les filaments sont coupés à la longueur puis le pliage est terminé manuellement.

Les filaments « spiralés » sont enroulés en hélice sur une âme en molybdène qui est retirée en fin de fabrication. Ils sont coupés à la longueur et recouverts d'alumine par électrophorèse (1).

2° Filaments émissifs.

Ces filaments en ruban ou en fil sont recouverts par électrophorèse de carbonates de baryum et strontium et isolés des agents atmosphériques par du collodion.

3° Cathodes à chauffage indirect.

Les tubes en nickel sont obtenus par tréfilage puis tronçonnés et décapés électrolytiquement. Ils sont ensuite montés sur des cadres qui protègent les extrémités et recouverts de carbonates par une suspension projetée au pistolet sur machine automatique. Pour certaines applications (tubes pour hyperfréquences par exemple) le dépôt peut être réalisé par électrophorèse.

(1) Electrophorèse : Procédé qui consiste à produire un dépôt de particules sur une pièce à partir d'une suspension colloïdale sous l'effet d'un champ électrique.

III. LES GRILLES

A) Matériaux.

Les matériaux utilisés pour la fabrication des grilles doivent résister à la chaleur et ne pas donner d'émission de grille. On appelle ainsi l'émission d'électrons par les grilles portées à un potentiel négatif par rapport à la cathode.

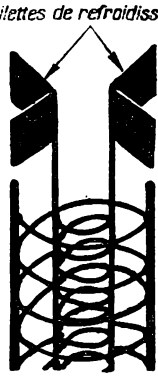


Fig. 9-26

Les grilles placées loin de la cathode qui ne chauffent que faiblement, ont leurs montants en nickel écroui et le fil de spiralage en nickel-manganèse (N-M2 ou N-M5) ayant une bonne conduction thermique.

Les grilles susceptibles de chauffer ont leurs montants en cuivre qui est bon conducteur de la chaleur. Le fil de spiralage est en molybdène de 25 à 200 microns, recouvert par électrolyse d'or ou de platine. Ce traitement a pour but de réduire l'émission de grille.

Pour améliorer le refroidissement les grilles des tubes de puissance sont surmontées d'ailettes métalliques noircies qui évacuent la chaleur par rayonnement (fig. 9-26).

B) Différents types.

1° Grilles pour tubes à vide.

a) GRILLES HÉLICOÏDALES.

1. Cylindriques, ovales ou plates (fig. 9-27 à 9-29). — Du point de vue rigidité, les formes ovales ou plates sont meilleures. La forme ovale la plus courante pour les grilles de commande des tubes à caractéristiques peu poussées permet la fabrication en grande série.

La forme plate permet d'améliorer les performances du tube.

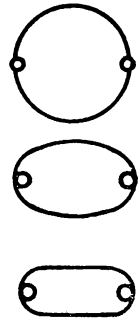


Fig. 9-27

Fig. 9-28

Fig. 9-29

Fig. 9-30

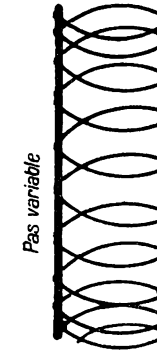


Fig. 9-31

Différents types de grilles

2. Grilles cadres (fig. 9-30). — Pour augmenter la rigidité lorsque le fil est très fin ($< 50\ \mu$), on soude des barrettes aux extrémités entre les montants. Elles se rapprochent de la forme plane idéale qui permet une meilleure utilisation du flux électronique. Les pentes obtenues sont élevées et le souffle est réduit (Utilisation en VHF).

3. Grilles à pas variable (fig. 9-31). — Elles permettent de faire varier l'amplification dans les tubes à gain réglable.

b) GRILLES PLANES.

1. Grilles réseau. — Elles sont constituées par un réseau à deux dimensions en fil fin de cuivre et trouvent leur utilisation dans les tubes analyseurs de télévision.

2. Grilles pour tubes à hyperfréquences. — La distance grille cathode de 20 à 25 μ nécessite une grille en nappe de fils fins parallèles de 5 μ de diamètre soudés sur disque.

c) GRILLES POUR TUBES CATHODIQUES.

Appelées électrode de contrôle ou « Wehnelt », elles sont constituées par un tube dont le fond est percé d'un trou laissant passer le flux électronique émis par la cathode. Leur forme empêche le bombardement de la cathode par des ions positifs (fig. 9-32).

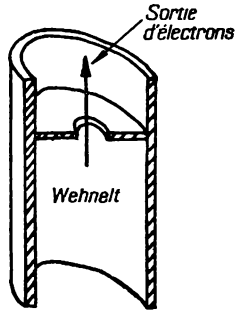


Fig. 9-32

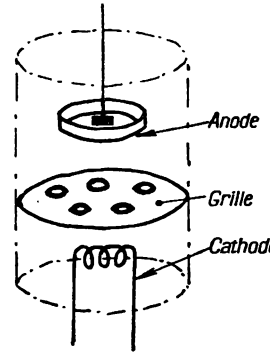


Fig. 9-33

Grilles de formes particulières

2° Grilles pour thyratrons.

Elles doivent permettre le déclenchement de l'arc pour une certaine valeur du rapport V_a/V_g. Elles doivent de plus empêcher l'action sur l'arc des charges électriques acquises éventuellement par l'ampoule, leur forme doit permettre un trajet bien défini de l'arc et permettre un refroidissement suffisant. Ces conditions sont remplies en adoptant la forme de la figure 9-33. Les dimensions et le nombre des trous jouent le même rôle que le pas de la grille dans les tubes à vide.

C) Fabrication.

Les grilles hélicoïdales sont réalisées sur tour automatique. Le fil des montants fourni par deux bobines est placé dans deux cannelures d'un mandrin en carbure de tungstène dont la section a la forme de la grille (fig. 9-34). Le mandrin tourne autour d'un axe horizontal pendant que le fil de grille s'enroule en hélice en passant dans les entailles des montants qui sont obtenues par une molette coupante. Le fil est ensuite serti dans les entailles par une autre molette (fig. 9-35). Les « bandes » de grilles sont ensuite coupées à la longueur voulue.

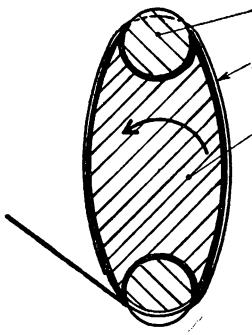


Fig. 9-34

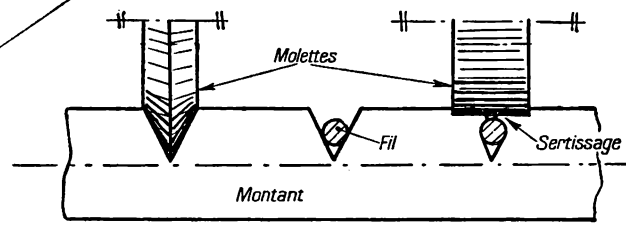


Fig. 9-35

Fabrication des grilles

En fabrication de petite série le fil de grille peut être fixé sur les montants par ligature (certaines grilles de grandes dimensions en émission) ou par soudure électrique.

IV. LES ANODES.

A) Matériaux.

Le choix du matériau et de la forme des anodes doit permettre d'évacuer facilement la chaleur qui provient du bombardement électronique.

1° Anodes refroidies par rayonnement. — Elles sont utilisées en réception ou en émission de petite puissance. Lorsque la puissance à dissiper est faible, elles sont en nickel. Pour augmenter l'évacuation de la chaleur, on les noircit en utilisant pour les tubes de réception :

— le nickel carburé ; le carbure de nickel étant noirâtre ;
— le fer plaqué d'aluminium noirci (fer aluminisé).

En émission de petite puissance on emploie :

— le molybdène zirconié ;
— le graphite usiné.

2° Anodes refroidies par convection. — Utilisées en émission de puissance elles sont refroidies par circulation d'air, d'eau ou de vapeur et sont généralement en cuivre qui conduit bien la chaleur et a une porosité faible aux gaz.

Fig. 9-36

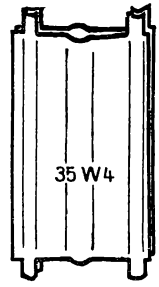
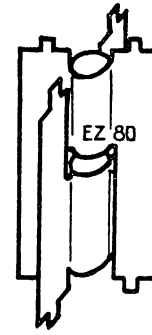


Fig. 9-37



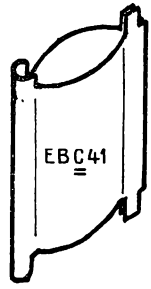


Fig. 9-38

Fig. 9-39

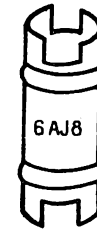


Fig. 9-40

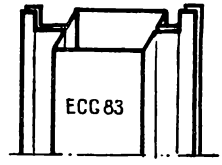


Fig. 9-41

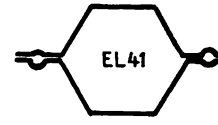


Fig. 9-42

Anodes de tubes à vide

B) Différents types.

1° Anodes pour tubes à vide de petite puissance.

Leur surface est calculée pour que leur température ne dépasse pas 400 °C et l'on est obligé pour certains tubes de mettre des ailettes de refroidissement (anodes des valves de redressement, fig. 9-36 et 9-37).

Pour la facilité de fabrication et améliorer la rigidité, les formes ovales ou circulaires sont préférables (9-39 et 9-40).

Pour l'augmentation des performances (pente plus grande, C_{ag} plus petite) les anodes ovales, rectangulaires ou prismatiques sont meilleures (fig. 9-38, 9-41 et 9-42).

La rigidité peut être augmentée par des nervures ou des plissements (fig. 9-40).

Une anode en graphite pour tube d'émission de petite puissance est représentée à la figure 9-43.

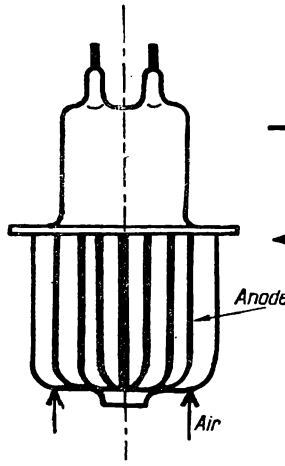


Fig. 9-44

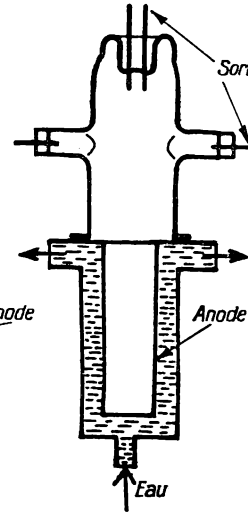


Fig. 9-45

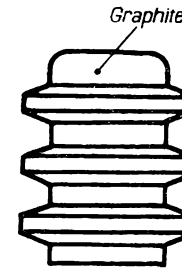


Fig. 9-43

Anodes pour tubes d'émission

2° Anodes pour tubes à vide de grande puissance.

L'anode en cuivre fait partie de l'enveloppe du tube et est munie d'ailettes dans le cas de refroidissement par air forcé (fig. 9-44) ou entourée d'une deuxième enveloppe avec eau de refroidissement circulant entre les deux parois (fig. 9-45).

3° Anodes pour tubes à gaz.

Les anodes de phanotrons ou de thyratrons sont constituées par des disques en nickel carburé ou mieux des cuvettes en graphite (fig. 9-46).

Les anodes des tubes de redressement industriels sont formées de cylindres pleins ou creux en graphite qui supporte bien les surcharges de courte durée.

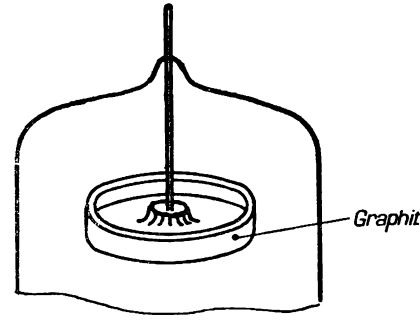


Fig. 9-46

Anode pour thyration

C) Fabrication.

Les anodes de tubes à vide sont découpées dans des bandes puis roulées ou embouties suivant la forme à obtenir. Leur rigidité est assurée par agra-

Fig. 9-49

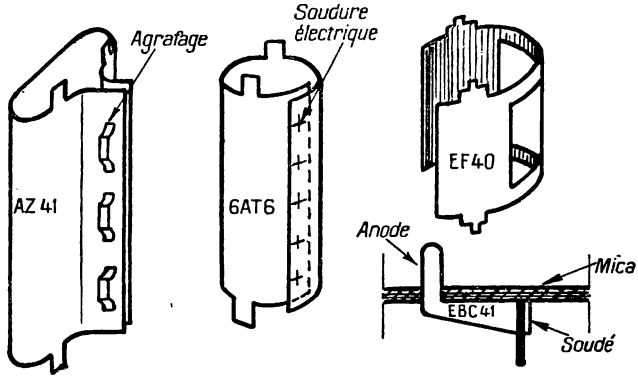


Fig. 9-47 Fig. 9 48 Fig. 9-50

Fixation d'anodes

fage ou soudure électrique (fig. 9-47 à 9-50). Avant montage, elles sont recuites sous vide. Les anodes en nickel sont carburées au four à 900 °C en atmosphère d'acétylène.

Les anodes en graphite sont usinées.

Les différentes électrodes sont fixées à l'embase par soudure électrique.

V. LES ENVELOPPES.

A) Matériaux.

1° Les verres. Voir tableau page suivante.

2° Alliages soudables au verre.

a) SOUDABLES AUX VERRES TENDRES.

— Platinite : Fe-N 48, alliage « 146 » : Fe-N 46,
— Ferro-chrome ou « Dilver O » : Fe-C30,
— Ferro-nickel Fe-N42,

utilisé dans la fabrication du « Copperclad » dont il constitue l'âme recouverte d'une couche de cuivre.

b) SOUDABLES AUX VERRES DURS.

— Fernico, Kovar, Dilver P. Ces alliages contiennent 15 à 25 % de de cobalt et 25 à 30 % de nickel (Exemple : Fe-N 29 Co 17).

TABLEAU 9-1

		Dilatabilité	Résistivité (Ω cm) à 20 °C	Résistivité (Ω cm) à 250 °C	tg δ à 100 MHz	Soudable à
Verres tendres	Verre à la chaux : verre blanc	95×10^{-7}	10^{12}	10^{6}		Copperclad Ferro-chrome Platine
	Verre au plomb : cristal	85×10^{-7}	10^{17}	10^{9}		
Verres durs	Sodocalcique : MO2A	43×10^{-7}	10^{13}	10^{10}	20×10^{-4}	Molybdène Fernico
	Borosilicaté : B 40	39×10^{-7}	10^{16}	10^{9}	30×10^{-4}	Tungstène
	Borosilicaté : Pyrex	32×10^{-7}	10^{15}	10^{8}	50×10^{-4}	

3° Les céramiques.

Certaines céramiques utilisées comme parties de tubes à vide, doivent pouvoir être scellées à des pièces métalliques et être étanches aux gaz.

— Forstérite ($2\,MgO,SiO_2$) soudable au titane et au ferro-nickel Fe-N45.
— Alumine (Al_2O_3) soudable au Fernico (et au cuivre avec certaines précautions).

B) Enveloppes « tout verre ».

1° Anciens modèles.

Le pied ou embase était réalisé par pincement (fig. 9-51). Ces modèles comportaient un culot en matière plastique traversé par les broches et fixé à l'ampoule par un ciment spécial (fig. 9-52).

Les inconvénients sont :

— Fabrication longue.
— Encombrement important.
— Culot se détachant lorsque le ciment vieillit.
— Longueurs de connexions entre électrodes et broches importantes, ce qui n'est pas favorable en HF.

Cette technique est encore utilisée pour de petites séries, pour les tubes cathodiques.

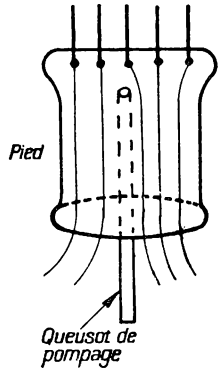


Fig. 9-51

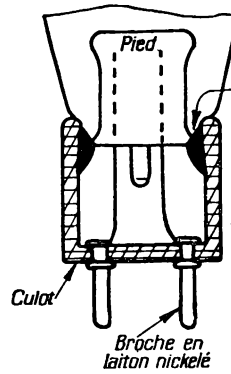


Fig. 9-52

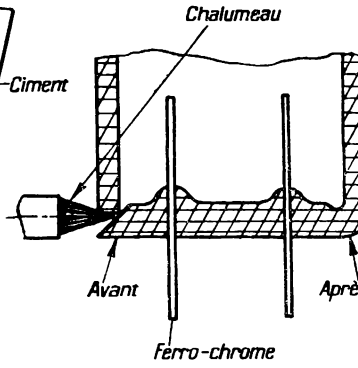


Fig. 9-53

2° Nouveaux modèles.

Les techniques nouvelles ont permis de supprimer les inconvénients ci-dessus. Le culot est supprimé et l'embase est constituée par un disque de cristal de 4 à 5 mm d'épaisseur traversé par des tiges de ferro-chrome de diamètre 1 mm supportant les électrodes à l'intérieur et servant de broches à l'extérieur (fig. 9-53).

L'embase est réalisée, soit par pressage à chaud de cylindres entourant les broches, soit par frittage de poudre de verre très fine.

L'ampoule est scellée à l'embase soit par fusion soit par un émail à base d'oxyde de plomb. La deuxième méthode utilisée pour les tubes « Rimlock » provoque moins de déformation.

La technique du pincement est utilisée pour la fermeture des tubes subminiatures plats (fig. 9-54).

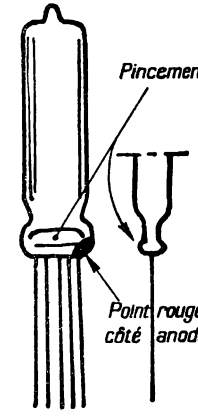


Fig. 9-54

Tube subminiature plat

C) Enveloppes « tout métal ».

Elles permettent la construction de tubes très robustes parfaitement blindés.

L'ampoule et l'embase toutes deux en acier sont soudées électriquement. Des passages en Kovar sont soudés aux perles de verre MO2A au travers desquelles passent les conducteurs (fig. 9-55).

Un autre exemple de tube tout métal est donné par les « magnétrons », utilisés comme générateurs d'impulsions HF dans les émetteurs radar. L'anode est constituée par l'enveloppe elle-même en cuivre.

D) Enveloppes « métal-verre » ou « métal-céramique ».

Cette construction est adoptée dans les tubes d'émission de grande puissance, l'anode en cuivre formant une partie de l'ampoule. Les dilatations du verre et du cuivre étant différentes la soudure doit se faire après un fort amincissement du bord en cuivre pour éviter les risques de fêlure (fig. 9-56) ou par l'intermédiaire d'une collerette en ferrochrome (fig. 9-57).

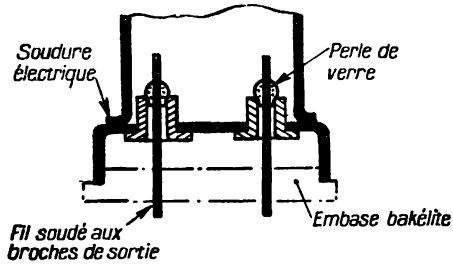


Fig. 9-55

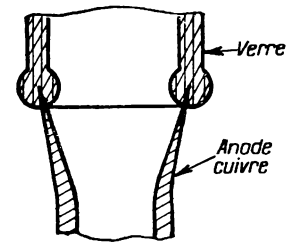


Fig. 9-56

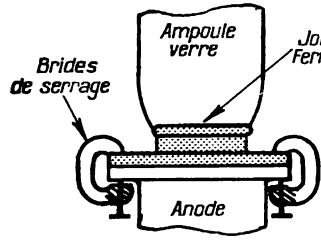


Fig. 9-57

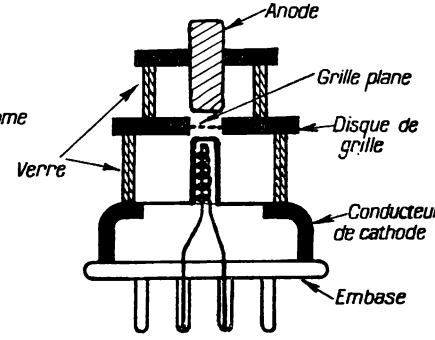


Fig. 9-58

Tubes « tout métal » ou « méta verre »

Les enveloppes mixtes se rencontrent encore dans des tubes pour hyperfréquences qui utilisent la technique des « disques scellés » avec l'association verre-métal ou céramique-titane. Cette technique permet d'ajuster avec précision les distances inter-électrodes à des valeurs très faibles nécessaires pour le bon fonctionnement aux fréquences élevées (fig. 9-58). Les céramiques utilisées sont à très forte teneur en alumine (Alucer 99). Obtenues par frittage à très haute température elles ont de très faibles pertes en HF jusqu'à 500 °C.

VI. LES ÉLÉMENTS COMPLÉMENTAIRES.

A) Les blindages.

Ce sont des enveloppes métalliques réunies à la masse qui empêchent l'action des champs électrostatiques sur les électrodes du tube. Ils peuvent être :

1° Extérieurs à l'enveloppe :

— tubes « métal-verre » (fig. 9-59) ;
— peinture métallisée (Cu, Zn, Al) sur l'enveloppe (fig. 9-60) ;
— boîtier amovible (fig. 9-61).

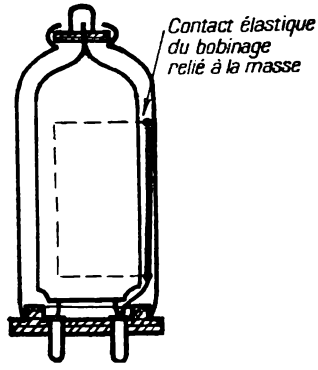


Fig. 9-59

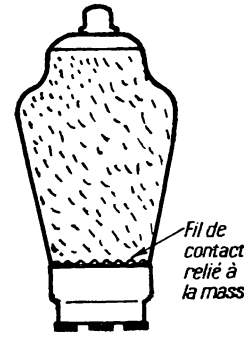


Fig. 9-60

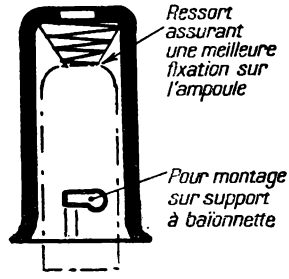


Fig. 9-61

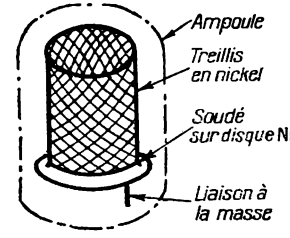


Fig. 9-62

Blindages

2° Constitués par l'enveloppe :

— tubes « tout métal » (fig. 9-55).

3° Intérieurs à l'enveloppe (fig. 9-62).

Treillis à mailles fines ou plaque entourant l'anode. C'est la solution adoptée sur la plupart des tubes Rimlock ou miniatures utilisés comme amplificateurs de tension.

Lorsque le tube comporte plusieurs systèmes d'électrodes on évite leur influence mutuelle à l'aide d'écran électrostatique.

B) Les supports d'électrodes.

Ce sont des pièces généralement en mica recouvert de magnésie, quelquefois en stéatite, qui, percées de trous, servent à maintenir les électrodes. L'élasticité du mica le rend plus intéressant car les trous où viennent se loger les tiges peuvent être d'un diamètre légèrement plus petit que celui de ces tiges, ce qui évite les vibrations.

Note sur l'effet microphonique.

C'est une modulation indésirable d'un ou plusieurs courants d'électrodes, qui résulte de vibrations mécaniques d'un ou plusieurs éléments du tube. Les vibrations à fréquence acoustique doivent être éliminées par les différents procédés suivants :

— Elévation de la fréquence de résonance des électrodes ;
— Amélioration de la rigidité des fixations ;
— Isolation élastique de la source de vibrations si elle est extérieure ;
— Utilisation d'un mica-frein de cathode « tubes 12AX7A et 12AT7A » (fig. 9-63).

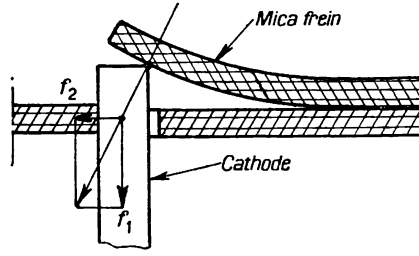


Fig. 9-63

La force f_2 applique la cathode sur le bord du trou tout en laissant libre la dilatation. La force f_1 applique le bourrelet de cathode sur le mica inférieur.

C) Fabrication.

Le vide des « tubes à vide » est compris entre 10^{-5} et 10^{-7} mm de mercure. Il ne peut être obtenu qu'en procédant de la façon suivante :

1° Raccorder le tube à une pompe à diffusion ou pompe moléculaire à vapeur de mercure.

2° Etuver par chauffage en HF à une température inférieure d'une cinquantaine de degrés au point de ramollissement du verre. Cette opération a pour but l'élimination de la vapeur d'eau absorbée par le verre et le mica.

3° Chauffer les électrodes en HF pour éliminer les gaz occlus. Le chauffage par induction HF consiste à entourer l'ampoule avec un solénoïde comportant quelques spires de gros fil de cuivre traversé par un courant d'une centaine d'ampères sous une fréquence de 500 kHz environ. Dans le cas de tubes « tout métal », le chauffage se fait au chalumeau.

4° Chauffage du filament et de la cathode par l'effet Joule, pour décomposer les carbonates en oxydes (« formation ») ou simplement pour effectuer un dégazage si la cathode est en métal pur.

5° « Flash » du dégazeur (getter).

Le dégazeur est une substance introduite dans le tube afin d'en accentuer le vide par action chimique ou physique sur les gaz résiduels.

Les dégazeurs tels que le baryum, le magnésium, l'aluminium s'évaporent et se condensent en des endroits où il ne peut y avoir de fuite électrique.

Il faut éliminer les gaz résiduels ou occlus qui s'évaporent dans les tubes à vide car les caractéristiques varieraient par suite de la création d'ions positifs.

Les dégazeurs absorbent les gaz résiduels qui pourraient aussi se former par la suite.

Fig. 9-64

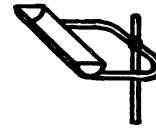


Fig. 9-65

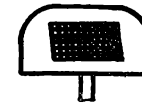


Fig. 9-66

Supports de getters

Les supports de dégazeurs en forme de coupelles, gouttières, etc., sont représentés aux figures 9-64 à 9-66.

6° Toutes ces opérations sont effectuées sur bâti fixe en petite série ou sur machines automatiques en grande série. Ces dernières sont des manèges rotatifs permettant de pomper 100 à 2 000 tubes à l'heure suivant leurs dimensions. Les pompes à vapeur de mercure font le vide chacune d'un tube

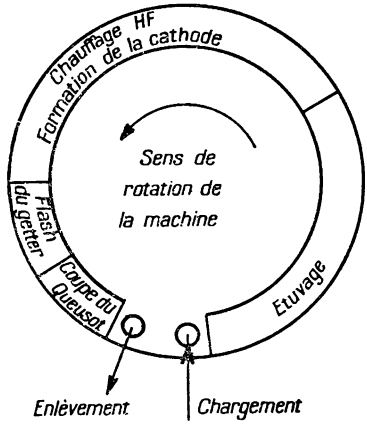


Fig. 9-67

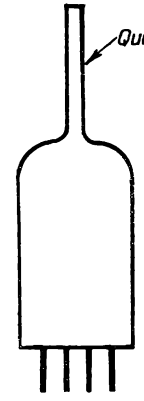


Fig. 9-68

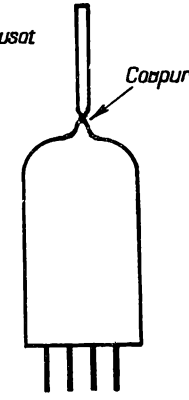


Fig. 9-69

électronique auquel elles sont raccordées sous le plateau tournant. L'étuvage est souvent supprimé pour les tubes miniatures, rimlocks ou novals et remplacé par un chauffage HF supplémentaire (fig. 9-67).

Ces opérations se terminent par le scellement du queusot en verre (fig. 9-68 et 9-69). Si le tube est tout métal le queusot est un tube de cuivre scellé simplement par écrasement puis étamé.

VII. LA DIODE.

A) Définitions [1].

Un *tube à vide* est un tube électronique dans lequel le vide a été suffisamment poussé pour que ses propriétés électriques ne soient pas essentiellement modifiées par l'ionisation du gaz ou de la vapeur résiduels.

Une *diode* est un tube électronique comportant deux électrodes : une cathode émettant des électrons et une anode (ou plaque) les recueillant.

Un *kénotron* est un terme industriel désignant les diodes à vide à cathode chaude.

B) Principe de fonctionnement.

1° Emission thermoélectronique.

Lorsque la cathode est chauffée, soit par la circulation d'un courant électrique dans le fil (chauffage direct) soit par l'utilisation d'un élément chauffant indépendant (chauffage indirect) un certain nombre d'électrons libérés de leurs liaisons atomiques acquièrent une énergie suffisante qui leur permet de quitter la cathode.

Ce phénomène résultant uniquement de l'agitation thermique s'appelle émission thermoélectronique ou *effet Edison*.

L'émission augmente quand la température augmente.

2° Charge d'espace.

Les ions positifs créés au sein de la cathode tendent à rappeler les électrons qui viennent de s'échapper. D'autre part les électrons expulsés forment autour de la cathode une barrière qui s'oppose à la sortie des électrons suivants. Ce nuage d'électrons crée une charge électrique négative appelée charge d'espace (fig. 9-70).

3° Rôle de la tension anodique.

En l'absence de tension positive sur l'anode il y a très peu d'électrons qui y parviennent et le courant traversant le circuit est très faible.

Lorsqu'on applique une tension positive sur l'anode le courant devient important. L'anode attire les électrons de la charge d'espace qui se reconstitue par émission thermoélectronique (fig. 9-71).

Rappelons que l'on a choisi comme sens de courant le sens opposé à celui du déplacement des électrons.

[1] La plupart des définitions données à chaque paragraphe sont tirées de la norme NF C 01-007. Vocabulaire électrotechnique (groupe électronique).

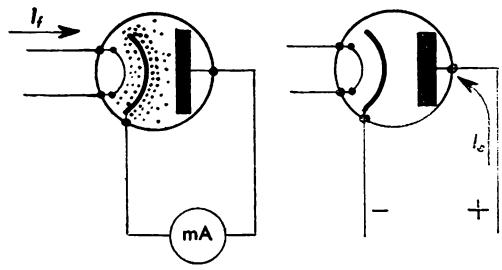


Fig. 9-70 et Fig. 9-71.
Diode : principe de fonctionnement.

C) Caractéristique statique.

La caractéristique statique est la courbe qui exprime la relation entre le courant d'anode I_a et la tension d'anode V_a pour une impédance de charge nulle, en régime continu. Les courbes obtenues pour différentes températures de la cathode T_1, T_2, T_3 sont celles de la figure 9-72.

1° Loi de Child-Langmuir.

Le courant obtenu est indépendant de la température de la cathode entre les points A et B. Il ne dépend que de V_a.

La relation qui lie I_a et V_a s'écrit

$$\boxed{I_a = G\, V_a^{3/2}} \quad : \text{ Loi de Child-Langmuir.}$$

G s'appelle la *pervéance* et ne dépend que de la géométrie de la diode : distance, forme et dimensions des électrodes; elle est indépendante des propriétés émissives de la cathode.
La loi de Child-Langmuir caractérise le régime de charge d'espace.

2° Loi de Richardson-Dushmann.

La caractéristique I_a (V_a) montre que le courant n'augmente plus lorsque la tension anodique dépasse une certaine valeur. La diode fonctionne en régime de *saturation*. Pour une certaine température de la cathode, l'anode capte tous les électrons émis à partir d'une certaine tension d'anode. Le courant n'augmente presque plus quand V_a continue de croître.

Courant de saturation I_s : valeur du courant en régime de saturation ou pouvoir émissif.

Pouvoir émissif spécifique J_s : C'est le nombre d'électrons émis par unité d'aire et par unité de temps. Il est représenté par la densité de courant d'émission.

$$J_s = \frac{I_s}{S}.$$

Les courbes de la figure 9-72 nous montrent que le courant de saturation dépend de la température de la cathode.

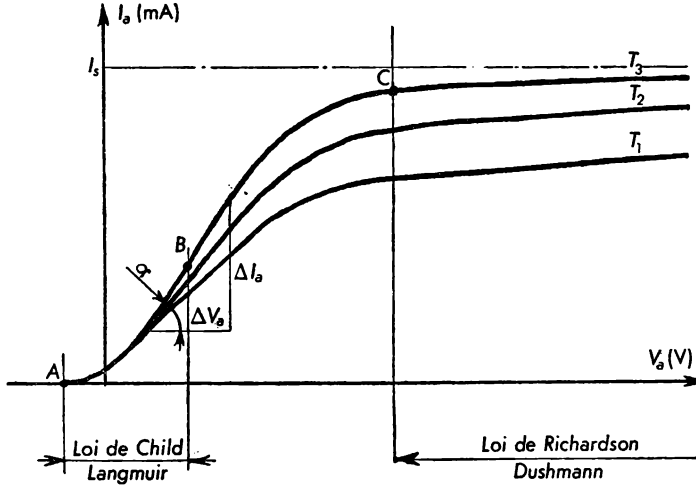


Fig. 9-72. — Caractéristiques de la diode.

La relation qui lie la densité du courant d'émission à la température est donnée par la loi de Richardson-Dushmann et s'écrit :

$$J_s = A\ T^2\ e^{-b/T}$$

J_s : densité du courant d'émission,
T : température absolue de la cathode en °K,
e : base des logarithmes népériens e = 2,718...,
A : constante dépendant de la nature de la cathode. Sa valeur est constante pour les métaux purs,
b : constante caractéristique de la nature de la cathode ou température absolue équivalente au travail d'extraction.

$b = \dfrac{W_s}{B}$ W_s : travail d'extraction
B : constante de Boltzmann = $1{,}38 \times 10^{-23}$ J/°K

Tableau 9-2. — Matériaux pour cathodes

	Tungstène	Tungstène thorié	Oxydes
A	60	3 à 15	10^{-3} à 1
b	52 400	30 500	11 600
T (°K)	2 500	1 800	1 000
J_s (A/cm²)	1	2	0,5

3° Effet Schottky.

Le courant de saturation ne peut pas être obtenu sur les tubes ordinaires car la cathode à oxydes serait détruite. Il se produit des points chauds avec fusion progressive et des lueurs bleuâtres dues à l'ionisation apparaissent car le vide n'est pas parfait.

Avec les tubes à cathode de tungstène, on a admis en première approximation que le courant de saturation ne croissait plus quand la tension positive de l'anode augmentait. En fait, pour des tensions élevées, il peut en résulter une augmentation importante du courant I_s que l'on appelle effet Schottky. Il est dû à l'action du champ électrique important au voisinage de la cathode qui facilite la sortie des électrons.

Cet effet est utilisé dans certains tubes électroniques fonctionnant en impulsions (magnétrons de radar).

4° Résistance interne.

La résistance interne en un point de la caractéristique est égale au rapport de l'accroissement de la tension par l'accroissement correspondant du courant.

$$\rho = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a}$$

ΔV_a en volts
ΔI_a en ampères
ρ en ohms.

Elle varie avec le point de fonctionnement. Elle est représentée par l'inverse de la pente de la caractéristique au point considéré (fig. 1-3) :

$$\rho = 1/\text{tg}\ \alpha.$$

D) Applications.

Les diodes se comportent comme des conducteurs unidirectionnels puisqu'elles ne laissent passer le courant que lorsque l'anode est positive. Cette propriété est utilisée dans deux applications importantes. Le redressement du courant alternatif industriel (valves d'alimentation) et la détection des courants de haute fréquence.

1° Valves d'alimentation.

En réception elles doivent fournir un débit de 100 à 300 mA sous une tension de 300 à 400 V. Le rendement de 20 à 40 % est d'autant plus faible que la valve est plus miniaturisée.

La figure 9-73 montre un exemple de valve d'alimentation. La figure 9-74 montre la disposition adoptée généralement pour les deux anodes d'une valve biplaque et la figure 9-75 une anode de valve pour récepteur tous courants. Les deux parties sont le plus souvent agrafées ensemble.

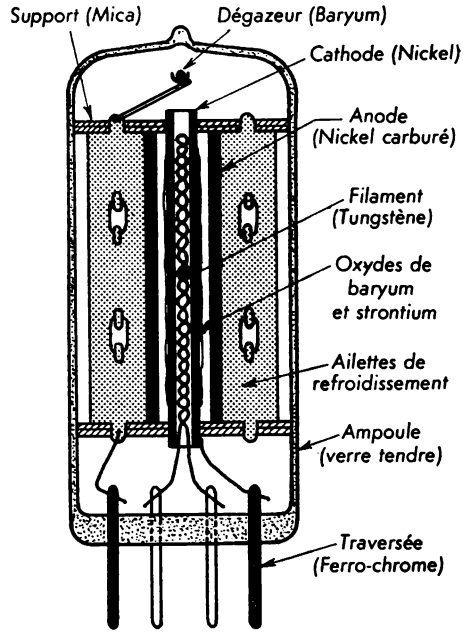


Fig. 9-73. — Valve d'alimentation.

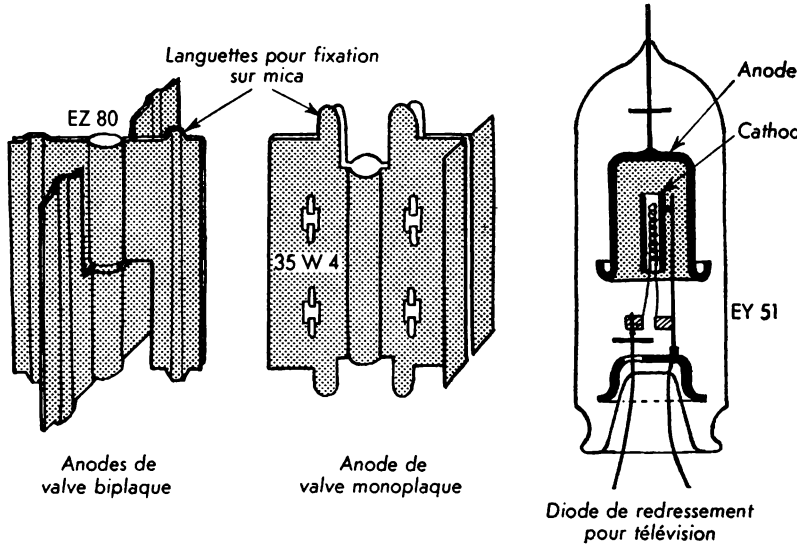


Fig. 9-74 à Fig. 9-76. — Diodes de redressement.

2° Diodes de détection.

Elles redressent des courants de l'ordre du milliampère sous des tensions de l'ordre du volt.

La fréquence de coupure qui peut atteindre plusieurs centaines de mégaherz est conditionnée par :

— La capacitance de l'intervalle cathode-anode qui doit être assez grande devant la résistance interne.

— Le temps de transit des électrons qui doit être faible devant la demi-période du courant de haute fréquence.

Pour des fréquences plus élevées, on emploie des diodes à cristal dont la fréquence de coupure atteint plusieurs milliers de mégaherz.

Les figures 9-77 à 9-78 montrent quelques exemples constructifs de diodes de détection.

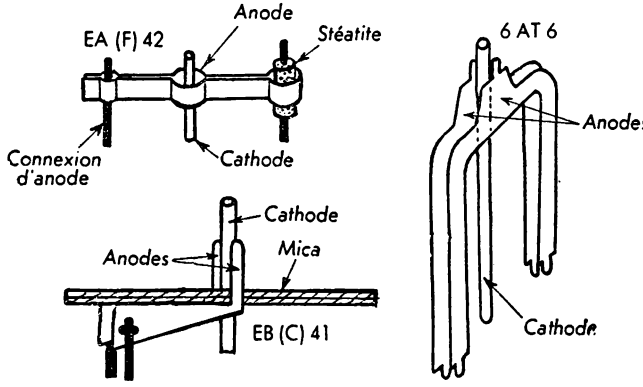


Fig. 9-77 à Fig. 9-78. — Diodes de détection.

3° Diodes de redressement.

La figure 9-75 montre une diode de redressement pour T.H.T. utilisée en télévision. Les différences constructives avec les modèles précédents sont dues à la très haute tension d'anode (10 à 20 kV) et au courant très faible. Les formes adoptées évitent la création d'arcs ou d'effluves.

Certaines diodes à haute tension et enveloppe céramique sont prévues pour fonctionner en impulsions à température élevée.

L'anode est soit cylindrique, soit plane et comporte des ailettes permettant la fixation et assurant la rigidité.

VIII. LA TRIODE.

A) Définition.

Une triode est un tube électronique à trois électrodes : une cathode, une anode et une électrode de commande (grille).

La triode a été inventée en 1907 par l'Américain Lee de Forest.

B) Principe de fonctionnement.

1° Grille négative.

Portons la grille à un potentiel négatif par rapport à la masse (fig. 9-79). On constate que pour un même potentiel d'anode V_a, le courant I_a est inférieur à celui que l'on obtient avec un potentiel de grille nul.

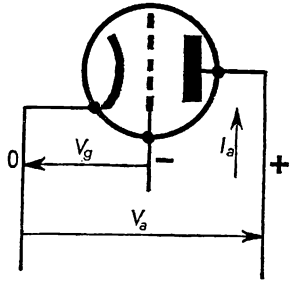


Fig. 9-79

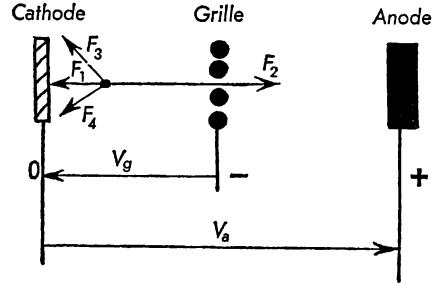


Fig. 9-80.

Fonctionnement de la triode.

Examinons les actions auxquelles est soumis l'électron lorsqu'il a été expulsé de la cathode par effet thermoélectronique. Nous voyons sur la figure 9-80 que quatre forces principales le sollicitent.

F_1 : force de répulsion due à la présence de la charge d'espace.

F_3 et F_4 : Forces de répulsion dues aux éléments de grille les plus proches.

F_2 : Force d'attraction de l'anode.

L'électron ne peut poursuivre son chemin vers l'anode que si la résultante des actions précédentes est dirigée vers l'anode. Lorsqu'on fait varier la tension de la grille, les forces F_3 et F_4 sont modifiées ainsi que le trajet correspondant des électrons. Les trajectoires sont matérialisées sur les figures 9-81. Nous voyons que la grille peut contrôler le flux électronique. Lorsque sa tension négative est suffisante aucun électron ne peut passer et le tube est bloqué. A mesure que la tension négative diminue le flux électronique augmente. Pour $V_g = 0$ on constate que son influence est négligeable.

2° Grille positive.

Lorsque la grille est portée à un potentiel positif, elle constitue avec la cathode une diode. Elle accélère les électrons et le courant I_a continue à augmenter mais les électrons qui passent à proximité sont captés et on observe un courant de grille qui croît très vite avec la tension de grille.

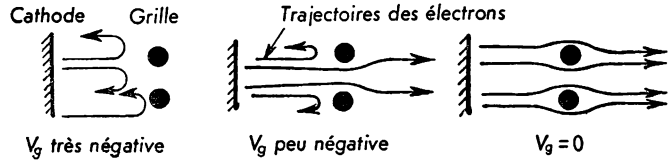


Fig. 9-81. — Influence de la grille.

Lorsque le potentiel de grille dépasse une certaine valeur, le courant I_a diminue car la grille prélève une fraction importante de l'émission cathodique.

Le courant de grille qui est utilisé dans un certain nombre d'applications par suite du rendement plus élevé peut cependant provoquer de la distorsion d'amplitude.

Il ne doit pas dépasser certaines valeurs qui provoqueraient une émission thermoélectronique de grille et un échauffement exagéré avec déformation, mettant le tube hors caractéristiques. Certains traitements tels que la dorure ou le polissage électrolytique permettent de diminuer cette émission thermoélectronique.

C) Caractéristiques statiques.

1° Caractéristiquves I_a (V_a) : (fig. 9-82).

Lorsque $V_g = 0$ on obtient une caractéristique analogue à celle d'une diode. En appliquant des tensions négatives à la grille les nouvelles caractéristiques obtenues se déduisent sensiblement par translation de la précédente. L'ensemble des courbes obtenues s'appelle réseau de Kellog.

La saturation ne peut être obtenue qu'avec des cathodes de tungstène.

De plus le point de repos de la triode doit être choisi au dessous de l'hyperbole de dissipation maximale. Elle est construite à partir de $P_a = V_a I_a$, puissance maximale que peut dissiper l'anode en régime permanent.

2° Caractéristiques I_a (V_g) : (fig. 9-83).

Lorsque la tension de grille est suffisamment négative le tube est bloqué et le courant I_a est nul. En augmentant progressivement la tension sur la grille on constate d'abord que la courbe est assez incurvée. Le courant I_a augmente assez lentement car la répulsion de la charge d'espace est prépondérante. Ensuite la pente de la caractéristique augmente et se maintient à une valeur sensiblement constante jusqu'à $V_g = 0$. Lorsque V_g prend des valeurs positives le tube fonctionne avec un courant de grille important. Au-dessus d'une certaine valeur, I_a diminue car une partie importante des électrons est captée par la grille au détriment de l'anode.

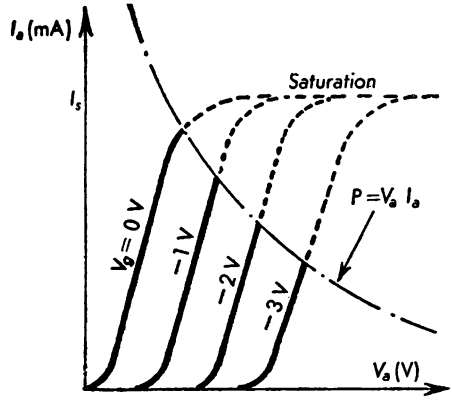


Fig. 9-82

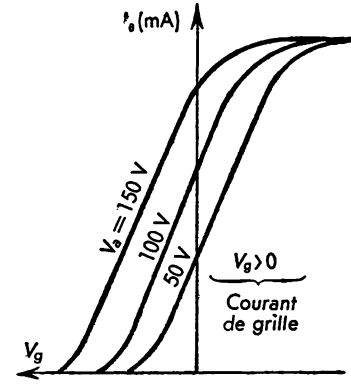


Fig. 9-83

Caractéristiques de la triode.

Pour des tensions d'anode différentes on obtient de nouvelles courbes qui se déduisent sensiblement de la précédente caractéristique par translation.

Ces courbes nous montrent que pour des variations peu importantes de la tension grille on obtient de grandes variations de l'intensité anodique.

D) Paramètres de la triode.

1° Valeurs usuelles.

Les paramètres varient entre les limites suivantes :

Résistance interne : $6\,000\ \Omega < \rho < 60\,000\ \Omega$.
Pente (ou transconductance) : $1{,}2\ \text{mA/V} < S < 12\ \text{mA/V}$.
Facteur d'amplification : $K < 100$.

2° Influence de la géométrie du tube.

La résistance interne augmente :

— avec la distance anode-cathode;
— avec le diamètre du fil de grille;
— lorsque le pas de la grille diminue;
— lorsque la surface émissive de cathode diminue.

La pente augmente :

— lorsqu'on diminue la distance grille-cathode;
— lorsqu'on diminue le pas de la grille;
— avec le diamètre du fil de grille;
— avec la surface émissive de la cathode.

Le facteur d'amplification augmente :

— avec la distance anode-grille;
— avec le diamètre du fil de grille;
— si on diminue le pas de la grille.

Une structure rectangulaire se rapprochant de la forme plane idéale permet d'améliorer les performances de la triode, mais la fabrication est plus délicate et la rigidité plus difficile à obtenir.

E) Inconvénients de la triode.

1° Performances.

Nous avons vu que les triodes peuvent avoir des pentes élevées mais que leur résistance interne et leur coefficient d'amplification sont faibles.

Bien que l'amplification en tension et le rendement des triodes soient faibles, elles ont l'avantage de provoquer peu de distorsions et de peu amortir les circuits.

2° Capacités inter-électrodes.

Les électrodes, étant en regard, forment entre elles des condensateurs dont les capacités comprises entre un et quelques dizaines de picofarads, augmentent avec les dimensions du tube et le rapprochement des électrodes.

Les capacités grille-cathode (C_{gk}) et anode-cathode (C_{ak}) provoquent un affaiblissement des tensions alternatives. Cet affaiblissement augmente avec la fréquence.

Effet Miller :

La capacité anode-grille (C_{ag}) reporte sur la grille une partie des variations de la tension amplifiée. Il y a réaction et l'amplificateur peut produire des oscillations parasites qu'il faut généralement éviter. Tout se passe comme si l'espace cathode-grille était shunté par une capacité $C' = C_{ag}(1 + A)$. Si par exemple $C_{ag} = 10$ pF on obtient avec une amplification $A = 20$ une capacité C' dépassant 200 pF non négligeable en H.F.

F) Différents modèles.

La triode se prête bien à la plupart des fonctions demandées aux tubes électroniques : Amplification de tension, oscillations, déphasage, détection, commande de relais, etc.

L'étude de la géométrie du tube et l'amélioration des procédés de fabrication ont permis la réalisation d'une gamme assez étendue de doubles triodes utilisées dans les montages H.F. en télévision et en modulation de fréquence (pente 6 à 12 mA/V), dans les montages de multivibrateurs et de déphasage sur appareils de mesures.

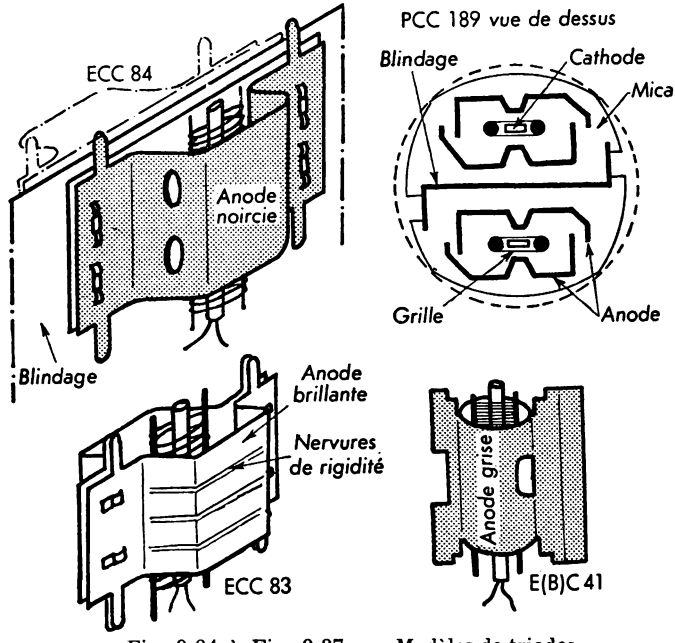


Fig. 9-84 à Fig. 9-87. — Modèles de triodes.

Les figures 9-84 à 9-87 montrent quelques modèles de triodes. Lorsque l'intensité anodique est importante la cathode est noircie (fer aluminisé noir

ou nickel carburé gris). Les doubles triodes sont séparées par un blindage électrostatique. Nous avons vu que l'obtention de fortes pentes est obtenue par rapprochement de la distance cathode-grille et l'augmentation de la surface émissive. Ces principes apparaissent bien sur la vue du tube PCC 189 dont la pente obtenue est de 12,5 mA/V (cathode rectangulaire, grille cadre, fil de grille de 10 μ de diamètre et distance grille-cathode de 57 μ) (1). La forme d'anode permet un rapprochement sans augmentation de la capacité.

L'effet microphonique est diminué par utilisation d'un mica frein ou par centrage de la cathode par un mica de faible épaisseur maintenu entre deux micas plus épais.

IX. LA TETRODE.

A) Définitions.

La tétrode est un tube électronique à quatre électrodes : une cathode, une anode, une électrode de commande et une électrode supplémentaire constituée généralement par une grille.

Lorsqu'un tube contient plusieurs grilles on peut les désigner par leur numéro d'ordre à partir de la cathode, par exemple :

— grille n° 2 (ou g_2) : grille occupant le rang 2 à partir de la cathode.

B) Principe.

La grille placée entre la grille de commande et l'anode s'appelle grille-écran. Elle est portée à un potentiel positif fixe ($\leqslant V_a$) dont le rôle est de réduire l'effet électrostatique de l'anode dans l'espace situé entre la grille-écran et la cathode. Les avantages sont les suivants :

1° La capacité anode-grille de commande est nettement diminuée.

C_{ag} mille fois plus faible que pour la triode.

2° La grille-écran est aussi une grille accélératrice dont l'action précède celle de la plaque. Lorsque les électrons arrivent vers la grille-écran l'action de l'anode devient prépondérante.

Il en résulte que pour une même amplification on peut utiliser une tension d'anode plus faible.

La grille-écran capte néanmoins un certain nombre d'électrons et il se produit un courant d'écran qui est de l'ordre du cinquième de I_a dans l'emploi normal des tétrodes.

3° L'interposition de la grille-écran éloigne l'anode de la cathode et il en résulte d'après ce que nous avons vu sur la géométrie de la triode que la résistance interne et le facteur d'amplification sont augmentés. La pente reste égale à celle d'une triode.

$$\begin{aligned} 20\ \text{k}\Omega &< \rho < 100\ \text{k}\Omega \\ 100 &< K < 1\,000 \\ 1\ \text{mA/V} &< S < 10\ \text{mA/V}. \end{aligned}$$

(1) Le fil doit être le plus fin possible afin d'éviter l'effet d'îlot.

4° Les caractéristiques dynamiques I_a (V_g) sont peu différentes des caractéristiques statiques.

Rappelons que la caractéristique dynamique est une caractéristique en régime alternatif à impédance de charge non nulle.

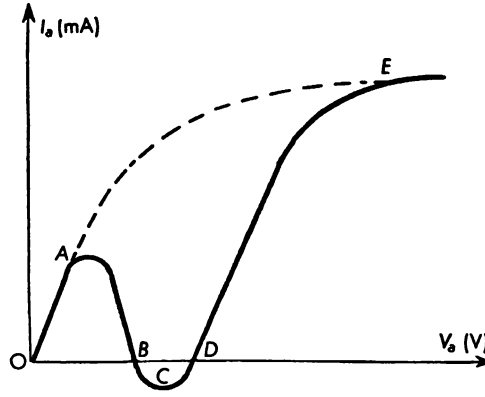


Fig. 9-88
Tétrode : effet dynatron.

C) Caractéristiques.

Les caractéristiques I_a (V_g) sont semblables à celles étudiées pour la triode.

Les caractéristiques I_a (V_a) présentent un crochet qui s'explique par l'émission d'électrons secondaires par l'anode et capturés par la grille-écran (effet dynatron) (fig. 9-88).

D) Effet dynatron.

Lorsque des électrons frappant l'anode possèdent des énergies suffisantes il se produit une émission secondaire d'électrons.

Ces électrons secondaires sont constitués par des électrons primaires réfléchés, réémis après un certain parcours dans le métal de l'anode ou par des électrons arrachés à l'anode.

Interprétation de la caractéristique I_a (V_a) :

— De A à B le courant Ia diminue progressivement car l'émission secondaire croît. Les électrons secondaires se dirigent en sens inverse des électrons primaires et sont captés par la grille-écran.

— De B à C le flux d'électrons secondaires est plus important que le flux d'électrons primaires et le courant I_a prend des valeurs négatives.

— A partir de C le phénomène s'inverse. Le nombre d'électrons secondaires diminue car la tension de plaque est suffisante pour rappeler ceux dont l'énergie est la plus faible.

— En E, il n'y a presque plus d'électrons secondaires et la courbe se confond pratiquement avec la courbe en pointillés qui représente le courant I_a qui existerait si l'effet dynatron était supprimé.

L'effet dynatron présente de sérieux inconvénients pour l'utilisation normale de la tétrode par suite de la distorsion d'amplitude qui en résulte et on n'utilise plus de tétrodes ordinaires.

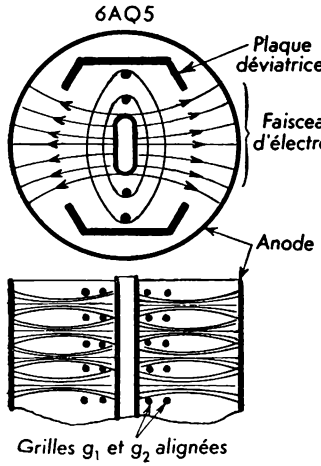


Fig. 9-89 et 9-90

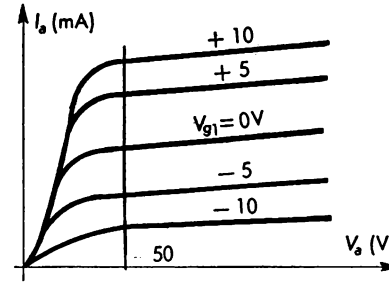


Fig. 9-91

Tétrode à faisceaux dirigés.

E) Tétrode à faisceaux électroniques (ou à faisceaux dirigés).

1° Description (fig. 9-89 et 9-90).

Elles possèdent deux plaques déviatrices reliées à la cathode. Elles ont pour but de concentrer les électrons primaires en un faisceau étroit par suite de la répulsion qu'elles provoquent. La concentration importante des électrons primaires animés de vitesses sensiblement identiques permet de repousser les électrons secondaires.

L'effet dynatron est supprimé.

Les propriétés sont améliorées du fait de la distance anode-écran plus grande que dans les tétrodes ordinaires (1) et de l'alignement des grilles g_1 et g_2 permettant une meilleure forme du faisceau et la diminution du courant d'écran.

2° Caractéristiques I_a (V_a) : (fig. 9-91).

Elles ne possèdent plus de crochet. Elles présentent un palier à partir d'une tension d'anode de 50 V environ. La puissance de sortie est importante pour une tension d'anode faible.

(1) On peut arriver expérimentalement à supprimer l'effet dynatron en éloignant suffisamment l'anode de la grille-écran. La distance minimale obtenue s'appelle distance critique (3 cm).

3° Applications :

Elles sont utilisées comme tétrodes de puissance avec les avantages suivants :

— Faible distorsion (le taux d'harmoniques de rang impair est plus faible qu'avec les pentodes).
— Rendement élevé.
— Puissance de sortie importante.
— Faible courant de grille-écran ($I_{g2} < I_a/10$).

X. LA PENTODE.

A) Définitions.

Une *pentode* est un tube électronique à cinq électrodes : une cathode, une anode, une grille de commande et deux électrodes supplémentaires constituées généralement par des grilles.

On appelle *grille d'arrêt* une grille placée entre deux électrodes positives (généralement grille-écran et anode et dont le rôle est principalement de réduire l'effet de l'émission secondaire.

B) Principe.

La grille d'arrêt g_3 appelée encore grille-frein ou suppresseuse est reliée à la cathode intérieurement ou extérieurement. Elle est à pas très lâche. Son potentiel négatif par rapport à l'anode lui permet de repousser les électrons secondaires. Les avantages obtenus comparables à ceux de la tétrode à faisceaux électroniques sont les suivants :

1° L'effet dynatron est supprimé. Le courant anodique croît sans inversion de pente quand la tension anodique augmente.

2° La tension anodique n'a plus, dans la pentode, qu'une faible influence sur le courant anodique, du fait de l'éloignement de l'anode et de la cathode, (voir caractéristiques).

3° La présence de la grille d'arrêt qui ajoute son effet de blindage électrostatique à celui de la grille-écran fait que la capacité anode-grille est très faible ($C_{ag} < 0{,}01$ pF).

4° La pente restant égale à celle de la triode équivalente, la résistance interne et le facteur d'amplification peuvent avoir des valeurs nettement plus élevées :

$$\begin{aligned} 50\ \text{k}\Omega &< \rho < 5\ \text{M}\Omega \\ 250 &< K < 5\,000 \\ 1\ \text{mA/V} &< S < 12\ \text{mA/V}. \end{aligned}$$

5° Les caractéristiques dynamiques sont confondues avec les caractéristiques statiques.

C) Caractéristiques (fig. 9-92).

Les caractéristiques I_a (V_g) des pentodes ordinaires sont semblables à celles des triodes.

Les caractéristiques I_a (V_a) présentent un palier à partir d'une tension anodique de l'ordre de 50 V montrant que les variations de la tension anodique n'ont pratiquement plus d'action sur le courant. Pour cette partie de la caractéristique le tube fonctionne en régime de saturation.

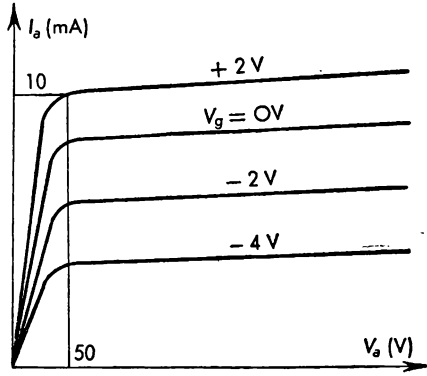


Fig. 9-92

Pentode. — Caractéristiques I_a (V_a).

D) Comparaison triode, pentode.

Les propriétés les plus importantes qui permettent un choix entre triode et pentode sont résumées dans le tableau ci-après.

E) Différents types.

1° Pentodes amplificatrices de tension.

a) Pentodes a gain fixe.

L'énergie dissipée sur l'anode étant peu élevée elle est en nickel brillant non traité.

Le circuit d'anode doit être efficacement séparé du circuit de grille de commande. En conséquence les pas des grilles g_2 et g_3 seront assez serrés.

TABLEAU 9-3. — COMPARAISON TRIODE-PENTODE

	TRIODE	PENTODE
S max	12 mA/V	12 mA/V
ρ max	60 kΩ	5 MΩ
K	100	5 000
Amplification	$A = K\,R_a/(\rho + R_a)$	$A \approx S\,R_a$
C_{ag} max	10 pF	0,01 pF
Caractéristique I_a (V_a)	I_a varie avec V_a	$I_a \approx$ C^{te} si $V_a > 50$ V
Rendement classe A	25 %	50 %
Rendement classe B	40 %	80 %
Harmoniques	pairs	impairs
Risques d'accrochages	<	>
Temps de transit	<	>
Bruit de fond	<	>
Transmodulation	<	>
Câblage	plus simple	plus délicat

Les figures 9-93 et 9-94 montrent un exemple constructif d'une telle pentode.

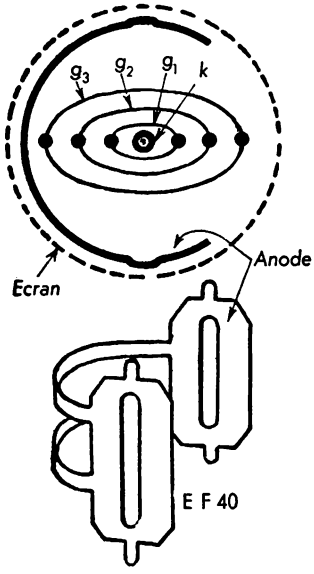


Fig. 9-93 et Fig. 9-94. — Pentode.

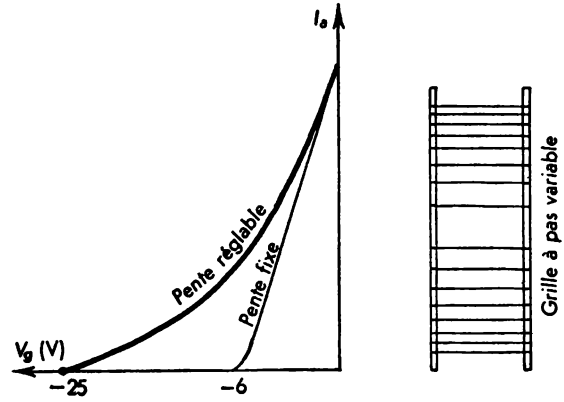


Fig. 9-95 et Fig. 9-96. — Pentode à gain réglable.

b) PENTODES A GAIN RÉGLABLE.

Une caractéristique du type de celle indiquée à la figure 9-95 peut être obtenue au moyen d'une grille à pas variable (fig. 9-96). La coupure se produit pour une polarisation nettement plus négative. Lorsque la polarisation est suffisamment négative les électrons sont repoussés aux endroits où les spires sont serrées. L'émission de la cathode est limitée à certains endroits (effet d'îlot) (fig. 9-97).
Ces pentodes sont utilisées dans les montages à commande automatique de gain (anti-fading).

c) PENTODES POUR AMPLIFICATEURS A LARGE BANDE.

Ces pentodes utilisées dans les amplificateurs « vidéo » en télévision nécessitent des pentes élevées. Nous avons vu qu'on obtient de fortes pentes en diminuant la distance grille-cathode et en réduisant le pas de la grille de commande.

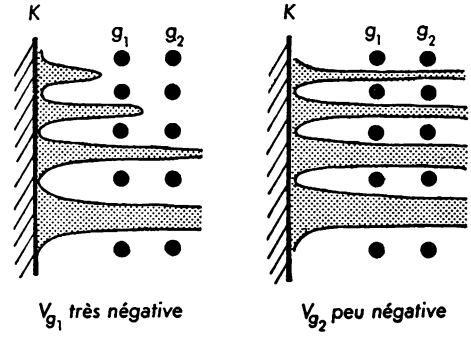


Fig. 9-97.
Pentode à gain réglable.

2° Pentodes de puissance.

L'énergie dissipée sur l'anode étant importante elle est en nickel carburé. La cathode plate a une surface émissive beaucoup plus grande. La grille de commande est surmontée d'ailettes de refroidissement (radiateur de grille). Les grilles g_2 et g_3 ont un pas plus lâche que celles des pentodes amplificatrices de tension.

Ces pentodes dont la figure 9-98 montre un exemple sont utilisées dans les étages de sortie des amplificateurs et récepteurs.

Les pentodes de puissance à anode dite « cavitrap » sont des tubes à faisceau électronique comportant une anode compartimentée grâce à laquelle l'émission secondaire est réduite au minimum (PL 500 utilisée pour le balayage lignes). Les pentodes de puissance 6FN5 utilisées aussi pour le balayage lignes des cinescopes 110° ont une anode en « sandwich » constituée d'une âme en cuivre plaquée de part et d'autre d'acier recouvert d'aluminium noirci. L'ensemble a pour but de permettre une dissipation de chaleur plus élevée. Le tube EL502 d'encombrement plus réduit possède une embase magnoval.

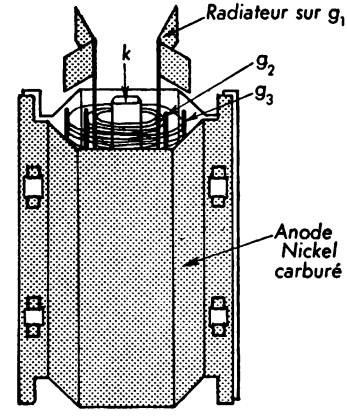


Fig. 9-98
Pentode de puissance.

XI. TUBES A PLUS DE TROIS GRILLES.

A) Définition.

L'*hexode*, l'*heptode*, l'*octode* (1) sont des tubes électroniques comportant 6, 7 ou 8 électrodes.

B) Principe.

Ces tubes sont utilisés dans les récepteurs superhétérodynes (à changement de fréquence) où ils jouent le rôle de mélangeurs du type multiplicatif.

La haute fréquence reçue f_1 est appliquée à l'une des grilles. Une deuxième fréquence f_2 créée par un montage oscillateur est appliquée à une autre grille du tube. Le flux électronique est soumis à l'influence des deux grilles. Il se produit un phénomène de battements dont la fréquence $F = f_1 - f_2$ est recueillie dans le circuit d'anode.

La pente d'un tel tube, dite *pente de conversion*, se définit comme précédemment avec la différence que la fréquence du courant d'anode est diffé-

(1) Il existe un tube à 9 électrodes, l'ennéode EQ 80 utilisé comme détecteur de phase en FM.

rente de la fréquence de la tension d'entrée qui lui a donné naissance. C'est le quotient de la composante du courant anodique par la tension sinusoïdale d'entrée appliquée.

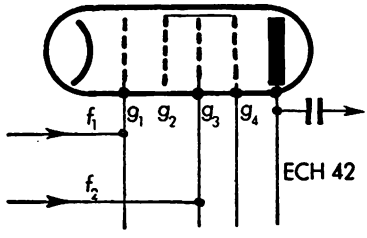


Fig. 9-99. — Hexode

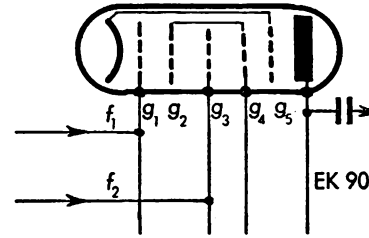


Fig. 9-100. — Heptode.

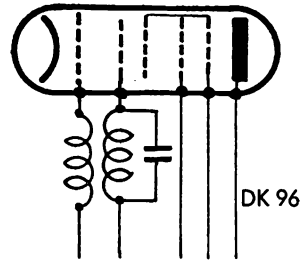


Fig. 9-101. — Heptode oscillatrice mélangeuse.

C) Différents types.

Les figures 9-99 et 9-100 donnent les schémas équivalents d'une hexode et d'une heptode. Les deux fréquences à mélanger sont appliquées aux grilles g_1 et g_3. Les grilles g_2 et g_4 reliées ensemble sont portées à un potentiel positif fixe pour former un écran électrostatique évitant toute réaction entre les circuits de fréquence f_1 et f_2.

L'heptode comporte en plus une grille d'arrêt g_5.

L'hexode oscillatrice-mélangeuse (fig. 9-101) a la grille g_2, jouant le rôle d'anode de l'oscillatrice, réduite généralement à ses deux montants sans aucun spiralage.

XII. TUBES MULTIPLES.

A) Définition.

On appelle tube multiple un tube électronique contenant dans une même enveloppe deux ou plusieurs groupes d'électrodes associées à des faisceaux électroniques indépendants.

B) Différents types.

Les principales combinaisons peuvent être désignées comme suit : double diode, double triode, double diode-triode, diode-pentode, double diode-pentode, triode-pentode, triode-hexode.

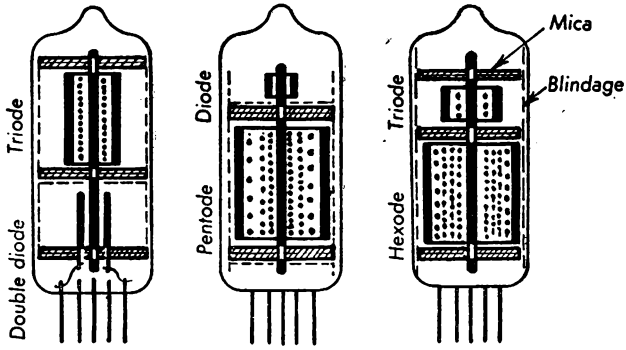


Fig. 9-102 à Fig. 9-104. — Tubes multiples.

Leurs avantages résident dans une diminution du prix de revient, de l'encombrement et dans un raccourcissement des connexions.

Les groupes d'électrodes sont souvent séparés par des écrans évitant les couplages parasites.

Parmi les plus courants citons : les diodes-triodes (fig. 9-102) dont la partie triode comme amplificatrice AF de tension ; les diodes-pentodes (fig. 9-103) dont la partie pentode est utilisée en amplificatrice RF, FI ou AF ; les triodes-hexodes dont la partie triode est montée en oscillatrice et la partie hexode en mélangeuse de fréquences (fig. 9-104) ; les doubles triodes ont été étudiées au paragraphe B.

Compactron : C'est le nom donné à des tubes américains comportant 3 ou 4 groupes d'électrodes dans la même enveloppe. Les dimensions sont réduites (⌀ 28 mm, hauteur 30 à 75 mm, culot 12 broches). Exemple : récepteur réalisé avec 2 compactrons.

XIII. TUBES CATHODIQUES.

A - Généralités.

1° Principe.

Les tubes cathodiques (ou à rayons cathodiques) font partie des tubes à faisceau électronique dans lesquels le flux d'électrons émis par la source se déplace en étant confiné dans une région déterminée de l'espace.

Les principaux tubes à faisceau électronique sont les tubes cathodiques, les tubes analyseurs d'image, les tubes hyperfréquence.

Les tubes cathodiques que nous examinons dans ce paragraphe peuvent être classés de la façon suivante :

- Ecran fluorescent usuel
  - Déviation magnétique
    - Indicateurs de radar
    - Cinescopes pour télévision
  - Déviation électrostatique
    - Oscilloscopes
    - Indicateurs cathodiques
    - Tubes compteurs
- Ecran fluorescent à mémoire électrostatique
  - Tubes à mémoire
  - Tubes à entretien d'image.

2° Définitions.

a) ASPECT EXTÉRIEUR (fig. 9-105).

— *Col* : Petite partie tubulaire adjacente à l'embase.

— *Cône ou robe* : Partie évasée en général conique de l'enveloppe du tube.

— *Fond* : Partie de l'enveloppe en verre à travers laquelle est observée ou projetée l'image.

— *Ecran* : Surface sur laquelle se produit l'image visible dans un tube cathodique.

— *Spot* : Petite tache produite instantanément sur l'écran par l'impact du faisceau cathodique.

— *Trace du spot* : Trajectoire du spot.

b) ELECTRODES (fig. 9-106).

— *Canon électronique* : Système d'électrodes ayant pour objet de produire et de concentrer un faisceau électronique.

— *Electrode d'accélération* : Electrode dont le potentiel crée un champ électrique ayant pour effet d'accroître la vitesse des électrons d'un faisceau électronique.

— *Electrode de concentration* : Electrode dont le potentiel est ajusté de manière à produire la convergence des rayons d'un faisceau électronique.

La concentration peut être obtenue au moyen d'un champ magnétique (bobine ou aimant) ou d'un champ électrique.

— *Electrode de déviation* : Electrode dont le potentiel crée un champ électrique ayant pour effet de dévier un faisceau électronique.

La déviation peut être commandée par un champ électrique (plaques de déviation constituant les armatures d'un condensateur) ou par un champ

magnétique (collier comprenant les bobinages et circuits magnétiques permettant d'obtenir la déviation).

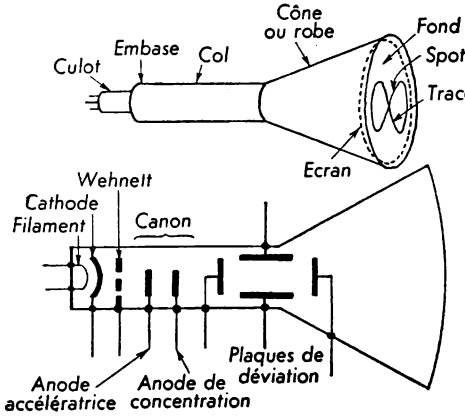


Fig. 9-105 et Fig. 9-106.
Oscilloscope.

— *Electrode de modulation* : Electrode de commande dans le cas d'un tube à faisceau cathodique. Elle joue le rôle d'une grille de commande.

— *Electrode post-accélératrice* : Electrode dont le rôle est d'accroître la vitesse des électrons en fin de trajectoire après déviation.

c) LUMINESCENCE.

— *Luminescence* : Processus par lequel la matière (substance luminescente) émet un rayonnement électromagnétique dont l'intensité pour certaines longueurs d'onde définies est supérieure à celle du rayonnement thermique à la même température.

— *Fluorescence* : Luminescence qui cesse un temps très court après l'excitation.

— *Phosphorescence* : Luminescence qui persite un temps appréciable après l'excitation.

— *Luminescence cathodique* (cathodoluminescence) : Luminescence provoquée par des rayons cathodiques ou des rayons bêta (électrons émis par des substances radioactives).

— *Activateur* : Impureté ou atome déplacé qui a pour effet d'accroître le rendement de la luminescence.

— *Sensibilisateur* : Impureté ou atome déplacé qui modifie la répartition spectrale de l'excitation d'une substance luminescente.

— *Base* d'une substance luminescente : Constituant cristallin dominant d'un solide luminescent.

— *Extincteur* : Substance introduite dans un corps luminescent afin de réduire la durée de la phosphorescence.

— *Poison* : Impureté qui dans un corps luminescent a pour effet de réduire le rendement de la luminescence.

— *Liant* : Produit servant à faire adhérer une substance luminescente sur un support tel que verre d'une lampe ou le fond d'un tube cathodique.

— *Déclin* : Décroissance de la luminescence après cessation de l'excitation. La durée du déclin s'appelle la *persistance.*

— *Fatigue* : Décroissance de la luminescence qui se produit lorsque la substance est exposée d'une manière continue à un rayonnement.

d) FONCTIONNEMENT.

— *Rayon électronique* : Trajectoire individuelle d'un électron dans un faisceau.

— *Densité d'un faisceau* : Densité en un point donné du courant transporté par des électrons.

— *Première convergence* : Première concentration du faisceau qui a lieu dans le canon.

— *Défocalisation* : Défaut caractérisé par la variation de la section du faisceau en fonction de sa distance à l'axe du tube et dont l'effet est d'agrandir le spot.

— *Tension de blocage* : Tension anodique au-dessous de laquelle le taux d'émission secondaire de l'écran est inférieur à l'unité. L'écran prend alors une charge négative qui repousse les électrons incidents.

— *Sensibilité de déviation* : Quotient du déplacement infinitésimal du spot par la variation correspondante de la tension de déviation (déviation électrique) ou par la variation correspondante de l'intensité dans la bobine (déviation magnétique).

— *Coefficient de déviation* : Inverse de la sensibilité de déviation.

— *Distorsion en trapèze* : Défaut d'un tube cathodique qui transforme en trapèze une image qui devrait être rectangulaire.

— *Distorsion du spot* : Défaut d'un spot dont la forme n'est pas circulaire.

— *Hyperluminosité du spot* : Excès de luminosité du spot dû à une intensité trop élevée du faisceau.

— *Halo* : Région annulaire entourant un spot, moins lumineuse que le spot, due à une réflexion de la lumière émise par le spot sur les faces avant et arrière du fond du tube.

B) Oscilloscopes cathodiques.

1° Généralités.

a) DÉFINITION.

— *Oscilloscope cathodique* : C'est un tube cathodique donnant une image visible, observée directement, qui est une représentation graphique d'une grandeur variable dans le temps.

L'appareil de mesure qui utilise un oscilloscope cathodique s'appelle *oscillographe cathodique* (NF C 01-020 et C 42-700).

L'écran luminescent fait apparaître l'image plus lumineuse que le fond (1). L'oscilloscope est appelé aussi tube à rayon cathodique (TRC).

b) PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT (fig. 9-106).

L'oscilloscope est un tube à vide (10^{-6} mm de Hg) à cathode chaude dont le flux d'électrons est contrôlé par une électrode (wehnelt) qui peut être portée à une tension négative par rapport à la cathode comprise entre 0 et — 40 V. Elle permet de régler la *brillance* (ou luminosité). Le faisceau électronique, après avoir passé par le trou du wehnelt est focalisé par le canon à électrons qui doit donner un spot aussi réduit que possible. Le canon à électrons comprend une ou deux anodes accélératrices portées à un potentiel de l'ordre de 1 000 à 2 000 V ayant pour but d'augmenter la vitesse des électrons et une anode de concentration portée à un potentiel de 500 à 1 000 V. C'est en ajustant cette tension que l'on règle la *finesse* du spot (ou convergence).

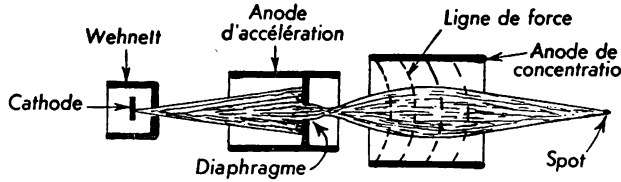


Fig. 9-107. — Forme du faisceau.

La trajectoire des électrons qui résulte de leur inertie et des forces électriques auxquelles ils sont soumis, est assez compliquée. La figure 9-107 en montre le principe.

Ces anodes sont appelées aussi lentilles électrostatiques car vis-à-vis des électrons elles jouent le même rôle que les lentilles optiques vis-à-vis des photons.

Le faisceau passe ensuite entre les plaques de déviation verticales et horizontales qui provoquent sa déflexion. Lorsque la différence de potentiel appliquée sur chaque paire de plaques est nulle, le spot se forme au centre de l'écran fluorescent.

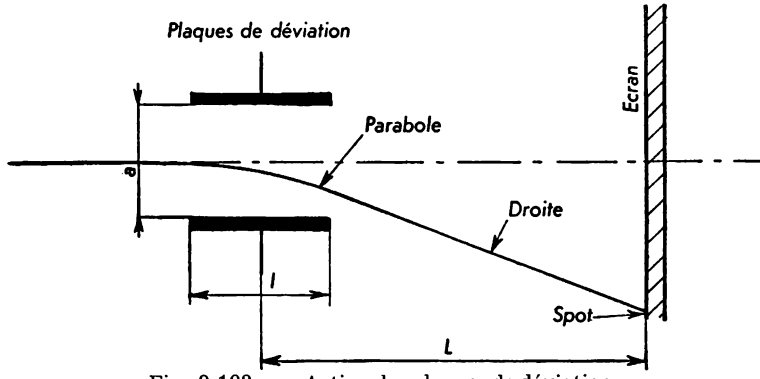


Fig. 9-108. — Action des plaques de déviation.

(1) Certains écrans absorbants permettent d'obtenir une trace sombre sur un fond clair (skiatron).

La déviation électrique (fig. 9-108) pour un oscilloscope donné ne dépend que du rapport de la tension de déviation V à la tension d'accélération U (1). Elle est donnée par la formule :

$$d = \frac{l \cdot L}{2\,a} \cdot \frac{V}{U}.$$

2° Description (fig. 9-109).

a) CATHODES.

Ce sont des cathodes à oxydes à chauffage indirect. Les oxydes sont déposés sur le fond du tube en nickel.

Le filament ne diffère pas de celui des tubes à vide ordinaires.

b) ELECTRODE DE CONTROLE OU DE MODULATION (WEHNELT).

Elle possède un trou circulaire qui focalise le faisceau d'électrons émis par la cathode. La forme du wehnelt entourant complètement la cathode a pour but d'éviter le retour d'ions positifs qui pourraient amener sa destruction prématurée.

Le wehnelt ainsi que les autres électrodes qui constituent le canon électronique sont en nickel.

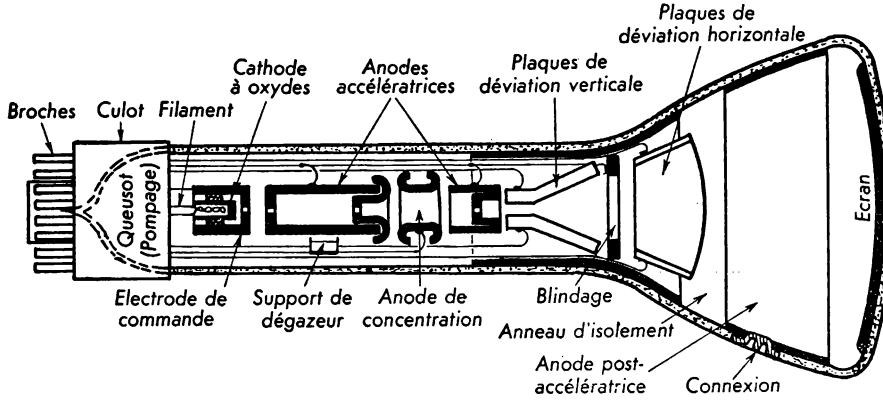


Fig. 9-109. — Oscilloscope cathodique.

(1) La déviation magnétique dont le principe sera examiné au paragraphe cinescope est employée lorsqu'on souhaite une déviation proportionnelle à un courant, la fréquence des courants de déviation étant déterminée une fois pour toutes (télévision, radar).

c) Electrodes accélératrices.

Les oscilloscopes comportent une électrode (canon triode) ou deux électrodes accélératrices (canon tétrode) réunies entre elles. Leur forte tension positive permet d'augmenter la vitesse des électrons ce qui évite l'étalement du faisceau. Les défauts de forme sont supprimés par passage à travers les petits trous circulaires des diaphragmes.

L'électrode accélératrice est réunie au revêtement interne de graphite colloïdal et le tout à la masse. Le revêtement interne évacue les électrons secondaires émis par l'écran lors du choc des électrons primaires.

d) Electrode de concentration.

C'est un cylindre en nickel dont le rôle principal est la concentration du faisceau par action des lignes de forces électriques. Cette électrode ainsi que les anodes accélératrices ont des bords arrondis pour éviter la formation d'effluves par suite des potentiels élevés auxquels elles sont soumises. Cette particularité n'a pas lieu d'être lorsque l'ensemble de ces électrodes forme un blindage compact.

e) Plaques de déviation.

Le système comporte deux paires de plaques en nickel, l'une pour la déviation verticale, l'autre pour la déviation horizontale. Elles doivent être rigides ce qui s'obtient par pliage des bords et fixation soignée. Leurs symétrie doit être parfaite afin d'éviter la distorsion en trapèze. Elles sont parallèles dans leur première partie puis divergentes après pour éviter l'interception du faisceau lorsqu'il est fortement dévié.

La sensibilité de déviation s'exprime en volts par centimètre. Son inverse s'appelle le facteur de déviation ($N = V/d$)

$$3 \text{ V/cm} < N < 60 \text{ V/cm}.$$

f) Anode post-accélératrice.

On l'utilise sur les tubes de grand diamètre.

La déviation d'un faisceau électronique est d'autant plus difficile à obtenir que la vitesse des électrons est grande du fait de leur inertie. Pour faciliter la déviation on n'accélère que moyennement le faisceau avant.

Après déviation on accélère de nouveau au moyen d'une anode post-accélératrice sous une forte tension (2 000 à 20 000 V) constituée par une couche de graphite colloïdal (aquadag) déposée sur la paroi interne de l'ampoule. Ce revêtement déposé sur le cône continue vers le canon avec une séparation appelée anneau d'isolement. La connexion se fait sur une corne de l'ampoule avec une prise à pince comportant un capuchon isolant. Les avantages procurés par l'anode post-accélératrice sont :

— augmentation de la luminosité ;

— absorption par la couche conductrice des électrons vagabonds qui viennent frapper l'ampoule ;

— écoulement des charges apportées par le faisceau électronique sur l'écran fluorescent;

— suppression des réflexions lumineuses parasites sur l'écran pouvant se produire sur l'arrière.

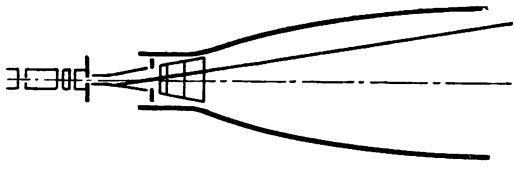


Fig. 9-110

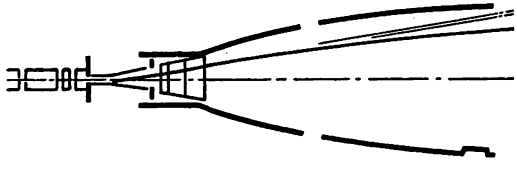


Fig. 9-111

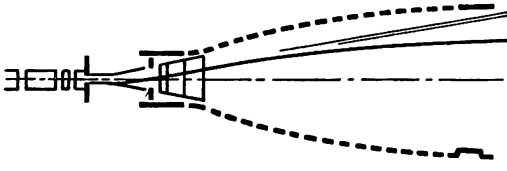


Fig. 9-112

Par contre l'emploi de très haute tension diminue la sensibilité et certains constructeurs ont réussi à y remédier en utilisant une anode post-accélératrice hélicoïdale assurant une répartition progressive du potentiel.

A sensibilité constante l'emploi de la post-accélération hélicoïdale donne une augmentation de luminance double par rapport à la post-accélération normale et triple par rapport à l'absence de post-accélération (fig. 9-110 à 9-112).

Une autre solution consiste à appliquer la tension post-accélératrice entre l'écran métallisé et une grille fine transparente aux électrons. Dans ce deuxième procédé la déviation n'est pas perturbée par la post-accélération et le champ uniforme ne provoque pas de déformation géométrique de l'image.

g) Ecran.

Le choc des électrons sur la substance fluorescente provoque l'émission de rayonnements électromagnétiques dont le spectre varie avec la substance et qui s'étend des rayons X mous aux longueurs d'ondes rouges de la lumière visible.

Sur les nouveaux tubes l'écran est aluminisé.

L'épaisseur d'aluminium est inférieure de 30 % à celle utilisée sur les cinescopes permettant ainsi aux électrons de la traverser pour des valeurs de THT comprises entre 3 et 6 kV.

Le tableau suivant donne les caractéristiques des principales substances utilisées pour les écrans.

Leur couleur correspond à celle de la dominante du spectre, celui-ci pouvant être plus ou moins étendu (exemples fig. 9-113).

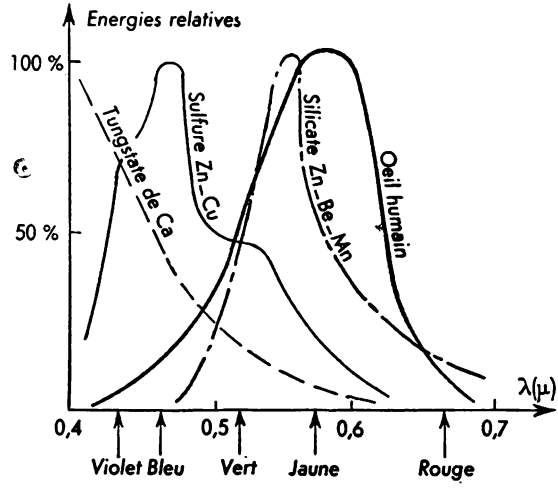


Fig. 9-113. — Sensibilités d'écrans.

La persistance ou rémanence se chiffre en pourcentage (1 % ou 0,1 %) de luminance qui subsiste après un certain temps. Exemples de persistance :

— Tubes pour enregistrement photographique : courte.
— Tubes de mesure ou de télévision : moyenne.
— Tubes pour radar : longue.

Il subsiste 1 % de la luminance maximale après 0,05 seconde pour les tubes de mesure les plus utilisés ou les tubes de télévision en noir et blanc.

TABLEAU 9-4. — DÉFINITION DE LA PERSISTANCE

Persistance	Temps au bout duquel il reste 10 % de la lumière initiale
Très courte	< 1 μs
Courte	1 à 10 μs
Semi-courte	10 à 1 000 μs
Moyenne	1 à 100 ms
Longue	100 ms à 1 s
Très longue	> 1 s

h) SUPPORTS D'ÉLECTRODES.

Pour maintenir l'alignement et la rigidité des électrodes on utilise :

— des baguettes de verre dans lesquelles sont piquées à chaud des tiges de ferro-chrome soudées aux divers éléments du canon (fig. 9-114) ;

TABLEAU 9-5. — SUBSTANCES POUR ÉCRANS

Base	Activateur	Couleur	Persistance	λ max du spectre	Rendement lumineux candéla/watt	Applications	Code		
							A	E	E′
Sulfure de zinc	Ag	bleue	courte	4580 Å	2,2	Photographie : Télévision couleurs	P 11	B	BE
Sulfure de zinc et sulfure de cadmium	Cu	orange	très longue	6250 Å	1,5	Phosphorescence : tubes pour radar	P 12	F	LC
Orthosilicate de zinc (calamine)	Mn	verte	longue	5250 Å	9	Très utilisé	P 2	N	GL
Silicate de zinc (willemite)	Mn	verte	moyenne	5230 Å	9	Tubes de mesures : très utilisé	P 1	G	GJ
Sulfure de zinc sur sulfure de zinc et cadmium	Ag + Cu	bleue suivie vert-jaune	courte très longue	4400 Å	2,4	Tubes à 2 couches pour radar et mesures haute persistance	P 7	P	GM
Sulfure de zinc	Cu	vert-jaune	longue	5000 Å	2	Ecrans de jour longue persistance		R	GP
Sulfure de zinc plus silicate double de zinc et béryllium ..	Mn	blanche	brève	4500 Å	2,5	Télévision noir et blanc	P 4	W	W
Borate de cadmium ..	Mn	rouge	longue	6500 Å	1	Insensible aux U.V. observations aériennes de nuit	P 13		R
Tungstate de cadmium	Cu	bl.-bleuté	courte	4900 Å	0,3	Sensible aux U.V.			

Code A : américain Code E : européen ancien Code E′ : européen nouveau

— des baguettes de céramique sur lesquelles les tiges sont fixées par un émail ;

— des rondelles de céramique ou de mica immobilisées dans un blindage général.

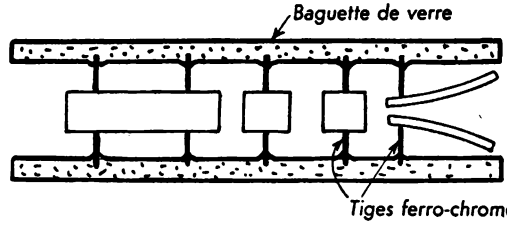


Fig. 9-114. — Fixation des électrodes.

Le centrage de l'ensemble dans le col est réalisé par des lamelles élastiques.

i) Enveloppe.

Il existe trois types de fond :

— fond bombé circulaire ;

— fond plat circulaire : moins résistant et de fabrication plus difficile;

— fond plat rectangulaire.

Les diamètres les plus utilisés sont 7, 10, 13 cm pour les appareils de mesure, 22, 31, 41 cm pour les tubes radar.

Le cône du tube peut être recouvert extérieurement d'un enduit conducteur en graphite colloïdal relié à la masse qui sert de condensateur de filtrage de la THT — ($C = 2\,000$ pF environ).

Les principaux culots utilisés sont les suivants : magnal (11 broches), duodécal (12 broches), diheptal (14 broches), octal (8 broches). Les oscilloscopes étant très sensibles aux champs magnétiques, il est presque toujours indispensable de les placer dans un écran magnétique à grande perméabilité (Mumétal).

3° Fabrication.

L'ampoule en verre peut être soufflée dans le cas de petits tubes à fond bombé ou par soudure verre-verre des trois parties : col, cône et fond pour les tubes à fond plat.

La couche fluorescente est déposée par sédimentation. Le liquide (eau bi-distillée) contenant la poudre remplit le fond de l'ampoule. Elle se dépose sur le verre avec du silicate de potasse qui provoque son adhérence. L'opération est délicate. Pour obtenir une épaisseur constante elle doit se faire à température constante et être rigoureusement exempte de vibrations. La métallisation effectuée sur certains tubes sera étudiée au paragraphe cinescopes.

Le pompage, la fermeture et la vaporisation du dégazeur s'effectuent comme pour les tubes à vide ordinaires.

XIV. CODE DES TUBES.

A) Code européen.

TABLEAU 9-6

1re lettre		lettres suivantes		1er chiffre		2e chiffre
Chauffage		Structure ou fonction		Modèle		
A	4 V alternatif	A	Diode	1	Tout acier	C'est un numéro d'ordre de série. Les différentes séries ne sont différenciées que par des détails qui ne changent pas les caractéristiques du tube ou le modèle.
B	180 mA continu	B	Duo-diode	2	Transcontinental	
C	200 mA tous courants	C	Triode	3	Octal	
D	1,4 V batterie	D	Triode de puissance	4	Rimlock	
E	6,3 V alternatif batterie	E	Tétrode	5	Spécial	
F	13 V batterie	F	Pentode	6	Subminiature	
G	5 V alternatif	H	Hexode-Heptode	7	Subminiature	
H	4 V batterie	K	Octode	8	Noval	
K	2 V batterie	L	Pentode de puissance	9	Miniature	
O	sans filament	M	Indicateur d'accord			
P	300 mA	Q	Nonode			
U	100 mA tous courants	X	Valve à gaz			
V	50 mA	Y	Valve monoplaque à vide			
X	600 mA	Z	Valve biplaque à vide			

B) Code américain.

TABLEAU 9-7

Premiers chiffres	Lettres		Chiffre suffixe	Lettres finales	
	Structure ou fonction			Aspect extérieur	
Ils se rapportent à la tension de chauffage en nombre entier	A	amplificatrice	Il indique le nombre de broches utiles soit en principe le nombre d'électrodes plus une.	G	ampoule verre
	B	double-diode pentode		M	ampoule métal
	C	triode pentode HF		MG	métal verre
	D ou K	pentode à pente variable		T	hauteur réduite
	E, G ou AF	indicateur d'accord		L	locktal
	H	double diode		B	valve à chauffage indirect
	J	pentode à pente fixe			
	L ou V	tétrode de puissance.			
	N	double triode			
	Q ou R	double diode-triode			
	TH	triode hexode			
	X, Y ou Z	valve biplaque			

C) Code des tubes cathodiques.

Le code nouveau européen utilisé pour la désignation des tubes cathodiques est résumé dans le tableau suivant.

TABLEAU 9-8. — CODE DES TUBES CATHODIQUES

1re lettre	1er nombre	2e nombre	2e groupe de lettres
Application	Dimensions en cm		1re lettre : couleur 2e lettre : lettre de série
A : cinescope (1) grand public D : oscilloscope simple trace E : oscilloscope plusieurs traces F : tube pour radar L : tube cathodique à mémoire M : cinescope professionnel P : tube à image (projection) Q : tube pour flying-spot	Diagonale : écrans rectangulaires Diamètre : écrans circulaires	Numéro de série	A : violet, pourpre B : bleu D : bleu-vert G : vert, vert-jaune K : jaune-vert L : orange R : rouge, rouge-orange W : blanc pour télévision X : écran trichrome (2) Y : jaune, jaune orangé

Exemple :

Tube D 13-15 GH

Oscilloscope à simple trace diamètre de l'écran : 13 cm ← 13 ; → lettre de série ; → couleur verte ; → numéro de série

Exemples :

EBF80 : tube chauffé sous 6,3 V — Double diode pentode série noval.
5Y3GB : tube chauffé sous 5 V — Valve biplaque tout verre à chauffage indirect.

XV. ESSAIS.

A) Généralités.

Les essais que subissent les tubes de réception sont de deux sortes :

1° Les essais de contrôle ou « de fabrication » qui sont relativement simplifiés et portent sur la totalité des tubes.

(1) Le terme cinescope est normalisé : vocabulaire électrotechnique C 01-007.
(2) Les lettres W et X sont utilisées sans seconde lettre.

2° Les essais statistiques qui sont soit des essais de laboratoire plus sévères et compliqués, soit des essais de durée. Ces deux genres d'essais ne portent que sur des prélèvements dans chaque lot fabriqué (1 % à 10 %).

Les clients peuvent être amenés à contrôler les tubes faisant partie d'une commande. Ils leur font subir des essais dits « de réception ».

B) Classification.

1° Essais de contrôle. — Ils sont effectués aussitôt les tubes terminés et recommancés après plusieurs semaines de stockage.

a) Essais mécaniques.

— courts-circuits entre électrodes,
— mauvaises soudures,

b) Essais électriques.

— émission de la cathode,
— mesure du courant de grille,
— mesure des caractéristiques statiques (3 à 5 points).

2° Essais statistiques.

— consommation du filament,
— coefficient d'amplification,
— résistance interne,
— pente,
— courant anodique pour une tension V_g donnée,
— courant de grille avec surchauffe du filament,
— influence du sous-chauffage de la cathode sur I_a,
— capacités des électrodes entre elles,
— fonctionnement dynamique du tube,
— éventuellement amortissement apporté par le tube à un C.O.,
— essais de durée.

XVI. NORMES.

SITEL 301. Alliage Fe Ni Co soudable au verre. Spécifications techniques. Règles de contrôle (1957).
SITEL 302. Tungstène utilisé en électronique. Spécifications techniques. Règles de contrôle (1961).
SITEL 303. Nickels pour cathodes de tubes électroniques. Spécifications techniques. Règles de contrôle (1957).
SITEL 304. Verres spéciaux et émaux destinés à la fabrication des tubes électroniques, semi-conducteurs et autres éléments assimilés. Spécifications techniques. Règles de contrôle (1957).

SITEL 305. Molybdène utilisé en électronique. Spécifications techniques. Règles de contrôle (1961).
SITEL 306. Bandes minces plaquées - Ni Fer Ni (1959).
SITEL 307. Bandes minces plaquées - Al Fer Al (1959).
SITEL 308. Bandes minces plaquées - Ni Fer Al (1959).
SITEL 309. Bandes minces plaquées - Ni Fer Ni électro (1959).
SITEL 310. Bandes minces plaquées - Cu Fer Cu (1959).
SITTEL 311. Alliage FeCr soudable au verre (1959).
SITEL 312. Spécifications de contrôle, d'aspect, de dimensions et de qualité des produits verriers destinés à la fabrication des tubes électroniques, dispositifs à semi-conducteurs et autres composants électroniques (1961).
SITEL 323. Symboles littéraux utilisés pour la rédaction des documents techniques concernant les tubes électroniques (1962).
FNIE 011. Recommandations relatives à l'utilisation des tubes électroniques.
UTE-C95-111. Tubes électroniques : Dimensions des culots et embases et de leurs calibres de vérification (1957).
UTE-C 95-112. Tubes électroniques : Encombrement (1956).
UTE-C 95-120. Formes et dimensions des coiffes et contacts isolés (1958).
CCT 272. Tubes d'émission de puissance inférieure à 1 kW : Caractéristiques électriques et dimensionnelles (1949).
CCT 271. Tubes à usage professionnel de réception.
CCT 08-05. Supports de tubes (1961).

CHAPITRE 10

LES DISPOSITIFS A SEMI-CONDUCTEURS

I. GÉNÉRALITÉS.

A) Définitions.

Un semi-conducteur est un conducteur non métallique d'électrons.

L'ordre de grandeur de leur resistivité est l'Ω cm à la température ordinaire.

$$10^{-2}\ \Omega\ \text{cm} < \rho < 10^{8}\ \Omega\ \text{cm}.$$

Ils ont un coefficient de température négatif c'est-à-dire qu'ils sont plus conducteurs à chaud qu'à froid.

B) Propriétés.

1° Conductibilité intrinsèque. — Les semi-conducteurs sont constitués par des réseaux cristallins dans lesquels tous les atomes sont liés entre eux par des valences homopolaires (mise en commun d'électrons entre atomes on covalence). L'énergie nécessaire pour rompre une valence est faible pour un semi-conducteur à température ordinaire, ce qui fait que l'agitation thermique suffit à libérer un certain nombre d'électrons.

La conductibilié qui en résulte est appelée conductibilité intrinsèque.

2° Conductibilité extrinsèque. — La figure 10-1 représente schématiquement un réseau cristallin de germanium parfaitement pur. Le germanium contient 4 électrons périphériques qui sont tous mis en commun avec les atomes voisins (liaisons covalentes).

a) Si le germanium contient une impureté telle que l'antimoine, chaque atome d'antimoine se substitue à un atome de germanium. L'antimoine possédant 5 électrons périphériques, l'un deux peut devenir libre puisqu'il ne participe pas aux liaisons intercristallines (fig. 10-2). La conductibilité est plus élevée que dans le cas du semi-conducteur pur. Elle est proportionnelle à la concentration de l'impureté.

Cette nouvelle conductibilité s'appelle conductibilité extrinsèque.

Lorsque l'impureté est un « donneur » d'électrons on obtient un semi-conducteur de type *n* (négatif).

b) Si le germanium contient une impureté telle que l'indium qui lui ne possède que trois électrons périphériques, il en résulte un trou ou lacune pour la quatrième liaison germanium indium (fig. 10-3). Les trous peuvent se

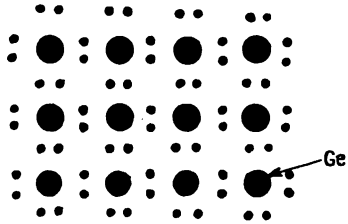


Fig. 10-1 Germanium pur

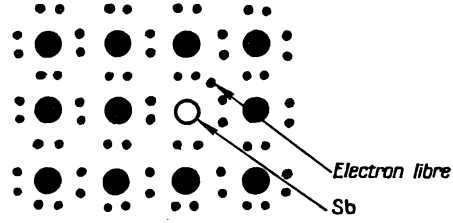


Fig. 10-2 Germanium de type *n*

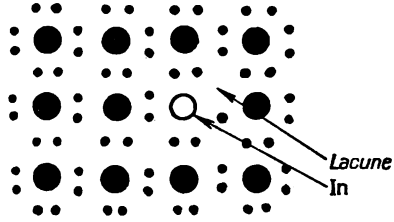


Fig. 10-3 Germanium de type *p*

déplacer comme les électrons dans le cas précédent. En réalité ce sont des électrons qui viennent combler les lacunes et celles-ci se déplacent en sens contraire.

Cette conductibilité extrinsèque s'appelle conductibilité par lacunes.

Lorsque l'impureté est un « accepteur » d'électrons, on obtient un semi-conducteur de type *p* (positif).

II. CORPS SIMPLES SEMI-CONDUCTEURS.

Les deux plus importants sont le silicium et le germanium appartenant au groupe IV de la classification périodique.

A) Germanium.

Il fond dans le vide à 958 °C. Il brûle dans l'air. On l'obtient à partir de l'oxyde $Ge\,O_2$. On le réduit ensuite par l'hydrogène vers 650 °C et l'on obtient du germanium renfermant un taux d'impuretés inférieur à 10^{-7}. Celui-ci est néanmoins trop élevé et il est nécessaire de le purifier par un procédé particulier appelé méthode de la « zone fondue » (zone melting).

Le germanium ne doit pas être utilisé à des températures supérieures à 80 °C.

1° Méthode de la zone fondue (fig. 5-4).

Le germanium à épurer est introduit dans une enceinte en atmosphère neutre. Une fusion locale est obtenue par chauffage HF au moyen d'une bobine extérieure parcourue par un courant HF. La zone fondue est déplacée le long du barreau par suite du déplacement longitudinal de la bobine. Les

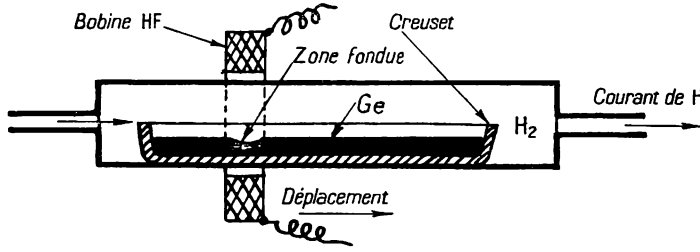


Fig. 10-4

Purification du germanium par « zone fondue »

impuretés se concentrent dans la partie en fusion et sont amenées progressivement à l'extrémité. Plusieurs passages permettent d'obtenir du germanium ayant un taux d'impuretés inférieur à 10^{-12}. L'extrémité contenant les impuretés est sectionnée. La résistivité du germanium obtenu est environ de 30 Ω cm.

2° Tirage d'un monocristal (fig. 10-5).

L'une des méthodes utilisées pour obtenir un cristal régulier de type *p* ou de type *n* consiste à additionner dans un bain de germanium pur la quantité nécessaire d'impuretés puis de plonger dans ce bain un petit cristal orienté (germe) que l'on soulève à faible vitesse. On obtient alors un monocristal dont le réseau cristallin est très régulier.

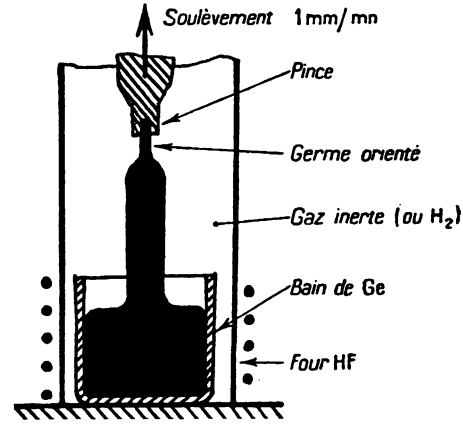


Fig. 10-5

Tirage d'un monocristal

B) Silicium.

Le silicium a des propriétés électriques analogues à celles du germanium mais son point de fusion plus élevé (1 420 °C) amène de plus grandes difficultés pour son épuration. La méthode de la zone fondue doit être utilisée verticalement sans creuset. La zone en fusion se maintient par tension superficielle entre les deux régions solides du barreau.

Différents procédés peuvent être employés pour son obtention : soit à partir du tétrachlorure de silicium ($SiCl_4$), soit à partir du ferro-silicium ou encore par purification du silicium commercial à 98 %. La résistivité obtenue est de l'ordre de 100 Ω cm.

La résistivité obtenue dans le silicium de type *p* par adjonction d'impuretés du groupe III (B, Al, Ga) va de 0,01 à 0,1 Ω cm.

Les applications sont les mêmes que celles du germanium mais avec possibilité d'utilisation jusqu'à 150 °C.

Les transistors au silicium sont susceptibles de fournir des puissances beaucoup plus importantes (plusieurs dizaines de watts)

C) Sélénium.

Le sélénium (groupe VI) est un semi-conducteur qui sert à réaliser des redresseurs secs possédant une résistance thermique satisfaisante (70 °C) et supportant des tensions inverses élevées. Ils ont une longévité considérable.

Il est utilisé aussi dans la fabrication de cellules photoconductrices ou à couche d'arrêt.

III. CORPS COMPOSÉS SEMI-CONDUCTEURS.

A) Semi-conducteurs III-V et II-VI.

La combinaison des éléments des groupes III et V ainsi que II et VI de la classification périodique donne des semi-conducteurs auxquels on peut donner les types *n* et *p* par l'introduction d'impuretés convenablement choisies. Les liaisons interatomiques sont en partie covalentes, en partie ioniques. L'énergie d'activation augmente avec le caractère ionique de la liaison.

Exemples : arséniure de gallium GaAs (diodes), phosphure de gallium GaP (électroluminescence), sulfure de cadmium CdS (mobilité de Hall élevées), antimoine d'indium InSb (cellules photorésistantes).

B) Carbure de silicium.

Il est utilisé dans la fabrication des résistances NL (voir 8e chapitre) et des igniteurs (voir tome II). Des transistors au carbure de silicium de type *n* avec diffusion d'aluminium pour obtenir le type *p* fonctionnent parfaitement jusqu'à 350 °C.

C) Sulfures.

Les sulfures de thallium et de cadmium sont utilisés dans les cellules photoélectriques sensibles aux radiations visibles. Le sulfure de plomb est sensible, lui, dans l'infrarouge.

D) Oxydes simples.

Les oxydes de fer, nickel, titane, magnésium, cobalt sont utilisés pour fabriquer les thermistances.

L'oxyde de cuivre associé au cuivre donne des éléments de redresseurs secs peu utilisés car les caractéristiques sont inférieures à celles des redresseurs séléno-fer.

IV. REDRESSEURS SECS.

A) Principe.

1° Définition.

Un redresseur sec est un redresseur à contact par surface appelé encore cellule à couche d'arrêt.

Son fonctionnement est basé sur les propriétés d'un contact ayant une certaine étendue entre un métal et un semi-conducteur.

2° Fonctionnement.

Les redresseurs secs utilisent la conductibilité dissymétrique existant au contact métal-semi-conducteur. Au contact il se produit une diffusion des électrons du métal dans le semi-conducteur. Le départ de ces électrons fait apparaître dans le métal des charges positives équivalentes. Cette double couche électrique appelée *couche d'arrêt* provient du fait que les deux corps en contact possèdent des travaux d'extraction différents (1). La différence des potentiels de sortie s'appelle *barrière de potentiel.*

L'agitation thermique libère environ un million de fois plus d'électrons dans le métal que dans le semi-conducteur. La probabilité est donc très élevée de voir diffuser les électrons du métal vers le semi-conducteur mais par contre il sera très difficile aux électrons du semi-conducteur de franchir la barrière de potentiel.

D'après la convention, il sera facile d'établir un courant dans le sens semi-conducteur métal et au contraire très difficile d'établir un courant en sens inverse.

B) Matériaux.

	U efficace max V	*I* redressée mA/cm²	Température max °C	Seuil de redressement
Oxyde cuivreux Cu_2O	4 à 7	25 à 100	50	0,1
Sélénium Se ..	18	25 à 100	80	0,4
Sulfure cuivreux Cu_2S.	4 à 5	100 à 400	100	—

(1) Le semi-conducteur utilisé habituellement est du type P. Son potentiel d'extraction est supérieur à celui du métal utilisé.

1° Redresseurs à l'oxyde cuivreux (dits oxymétal ou cuproxyde).

La couche finale d'oxyde cuivreux obtenue a 0,1 mm d'épaisseur environ.

Le contact sur l'oxyde de cuivre est obtenu par une rondelle de plomb graphité ou par projection d'alliages à bas point de fusion (fig. 10-6).

Ces redresseurs ne sont presque plus utilisés.

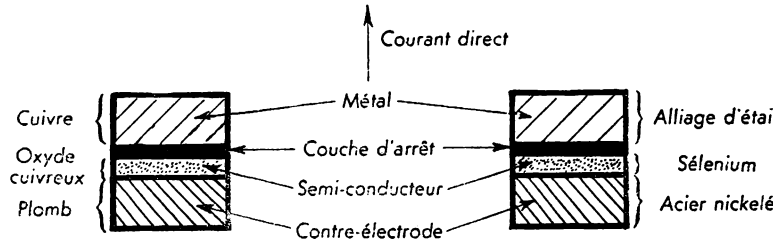


Fig. 10-6 Fig. 10-7.

Redresseurs secs

2° Redresseurs au sélénium.

Les principales étapes de fabrication sont :

— Découpage des plaquettes servant de contre-électrode en acier nickele ou en aluminium bismuthé pour neutraliser la couche d'alumine.

— Dépôt de la couche de sélénium soit par saupoudrage et compression à chaud, soit par vaporisation sous vide à 240 °C.

— Formation du sélénium cristallin par traitement thermique à 80 °C.

— Projection de l'électrode conductrice sur le sélénium. On utilise des alliages d'étain-plomb-bismuth ou de zinc-cadmium-bismuth (fig. 10-7).

La composition et la pureté de ces alliages ont une grande importance.

Les redresseurs subissent avant leur livraison plusieurs traitements de vieillissement artificiel qui leur confèrent une très grande stabilité.

3° Autres matériaux.

Le sulfure cuivreux permet des densités de courant plus élevées mais donne un courant inverse important.

Depuis peu on a réalisé des redresseurs titane-bioxyde de titane (TiO_2) qui résistent à haute température.

C) Limites d'emploi.

1° Caractéristiques de redressement.

Elles sont indiquées soit par certaines valeurs de la chute de tension directe du courant direct, du courant inverse et de la tension inverse, soit par des courbes telle que celle de la figure 10-8.

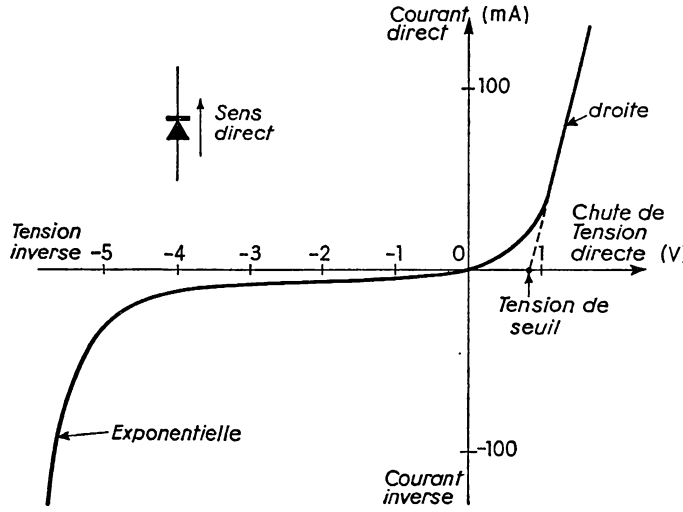


Fig. 10-8. — Caractéristique de redressement.

Pour les tensions directes la courbe est sensiblement droite après le coude. Pour les tensions inverses la caractéristique a une forme exponentielle.

2° Seuil de redressement.

Pour les petites tensions la résistance directe est du même ordre que la résistance inverse. Il n'y a redressement que si la tension dépasse une certaine valeur dite seuil de redressement qui est de 0,4 volt pour les redresseurs au sélénium et 0,1 volt pour les redresseurs à l'oxyde cuivreux.

3° Tension efficace inverse maximale.

5 à 6 volts par élément pour les redresseurs à l'oxyde cuivreux.
20 à 30 volts par élément pour les redresseurs au sélénium.

4° Densité de courant redressée.

0,1 A/cm^2 max. pour les redresseurs à l'oxyde cuivreux.
0,2 A/cm^2 max. pour les redresseurs au sélénium.

5° Service nominal.

Il peut être caractérisé par

— Un service continu.
— Un service temporaire spécifié par la durée de fonctionnement.
— Un service intermittent périodique spécifié par le facteur de marche (rapport entre le temps de fonctionnement et la durée totale du cycle).

6° Régime nominal.

Pour un élément constituant une valve, il est défini par :

— le courant direct nominal,

— la tension inverse nominale.

Pour des redresseurs complets, il est défini par :

— le courant continu nominal,

— la tension continue nominale.

7° Tension nominale.

Pour un élément constituant une valve, c'est la tension continue inverse nominale.

Pour un redresseur complet, c'est la valeur efficace de la tension alternative nominale entre les conducteurs de ligne en régime nominal et après vieillissement.

8° Pertes.

Elles sont généralement spécifiées en régime nominal.

9° Durée de service nominal.

C'est la limite inférieure de la durée au bout de laquelle, dans les conditions du régime nominal, la tension alternative nécessaire devient égale à sa valeur nominale.

D) Différents modèles (fig. 10-9 à 10-16).

Les modèles dépendent essentiellement du mode de serrage et du mode de refroidissement.

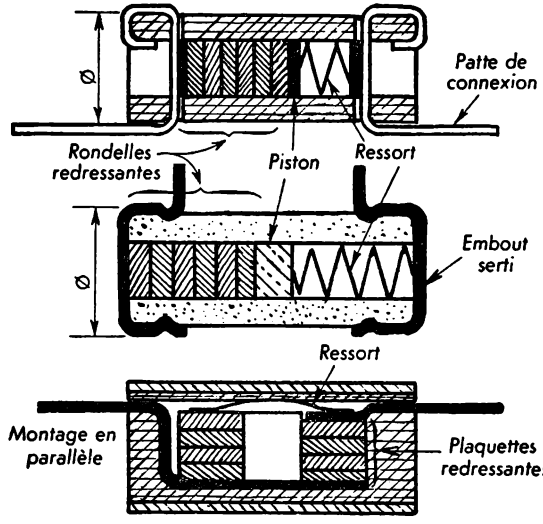


Fig. 10-9 à 10-11. — Redresseurs au sélénium

Le serrage peut être réglé par écrous et rondelles élastiques (10 à 15 N/cm² pour les redresseurs au sélénium) ou bien du type « autoserrage » au moyen de ressorts hélicoïdaux, de lames élastiques ou de pinces.

Le mode de refroidissement, dans l'ordre croissant des densités de courant redressées, peut être :

— Refroidissement à air naturel (convection).

— Refroidissement par contact avec le châssis (conduction) (fig. 10-15).

— Refroidissement par ailettes (fig. 10-11).

Le diamètre des ailettes de refroidissement en laiton est environ le double du diamètre des rondelles redressantes.

Pour faciliter la circulation de l'air il est recommandé de les monter axe horizontal.

— Refroidissement par ventilation forcée.

Les chiffres donnés par les constructeurs en ce qui concerne l'intensité redressée doivent être multipliés par un coefficient compris entre 2 et 3 en ventilation forcée (5 m/s).

— Refroidissement par eau ou huile.

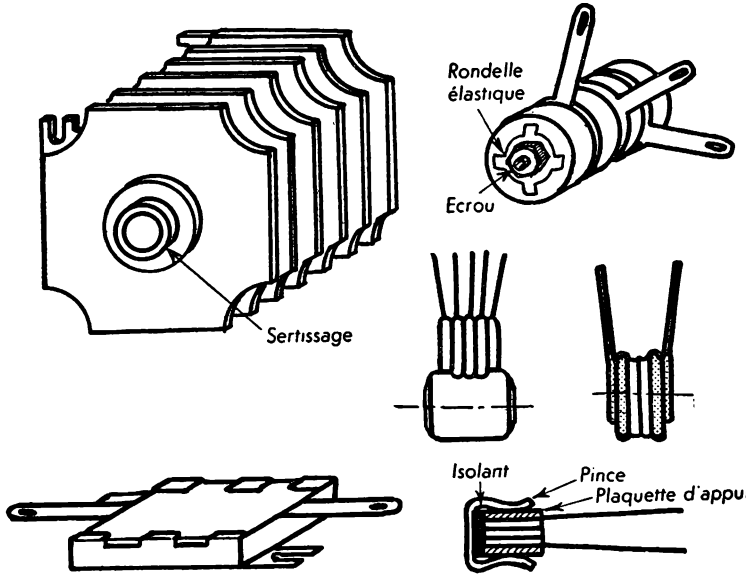


Fig. 10-11 à 10-16. — Redresseurs secs : différents modèles.

E) Caractéristiques électriques des éléments redresseurs à semi-conducteurs polycristallins (d'après NF C 53-210).

1° Fréquence nominale d'alimentation.

L'absence d'indication implique que la fréquence nominale est comprise entre 15 Hz et 100 Hz.

2° Mode de connexion.

Les modes de connexion les plus courants sont les montages monophasés, triphasés ou hexaphasés. Parmi les montages monophasés on rencontre les montages à une alternance, à prise médiane, doubleurs de tension, en pont, multiplicateurs de tension.

3° Type de la charge.

La charge peut être une résistance, une inductance, une capacité, une batterie, un moteur ou une combinaison de ces charges.

L'absence d'indication implique qu'il s'agit d'une charge résistante.

4° Température nominale.

C'est celle qui ne doit pas être dépassée lorsque l'élément est en service nominal avec les conditions de refroidissement spécifié.

Les températures ambiantes nominales sont de 35 °C dans le cas du refroidissement par air et de 25 °C dans le cas du refroidissement par eau.

5° Tension la plus élevée.

C'est la valeur de crête Up de la tension la plus élevée pouvant survenir entre les bornes du redresseur au régime nominal, à l'exclusion des surcharges transitoires.

6° Spécifications des groupes redresseurs.

En plus des caractéristiques électriques plus complètes que celles données ci-dessus, la norme spécifie les conditions générales d'utilisation telles que l'altitude, le refroidissement, les conditions d'installation, de stockage et d'alimentation.

F) Marquage.

Les éléments doivent porter normalement (1) les indications suivantes en caractères lisibles et durables :

— nom et marque de fabrique du constructeur,
— date de fabrication (année et trimestre par exemple),
— désignation du code,
— des repères sur les bornes du courant redressé : signe (+) ou marque rouge, signe (—) ou marque bleue,
— des repères sur les bornes du courant alternatif : signe (~) ou marques jaunes,
— si possible une flèche indiquant le sens direct des éléments.

Le code comprend deux séries de 5 signes (lettres et chiffres). La première série est le code de constructeur, la deuxième série est le code de structure établi de la façon suivante :

- Deux chiffres : nombre de cellules en série par bras.
- Une lettre : mode de connexion.
- Deux chiffres : nombre de cellules en parallèles par bras.

Exemple : 12 N 02

(1) Lorsqu'il est impossible de porter aucune indication sur les éléments, elles doivent figurer sur les emballages correspondants.

Les lettres utilisées sont les suivantes :

A : Une alternance
C : Prise médiane positive
N : Prise médiane négative
D : Doubleur de tension
B : Pont monophasé, (—) extérieur
P : Pont monophasé, (+) extérieur
H : Pont monophasé, ouvert
E : Etoile triphasé, (+) commun
Y : Etoile triphasé, (—) commun
F : Etoile hexaphasé, (+) commun
S : Etoile hexaphasé, (—) commun
G : Pont triphasé
K : Pont triphasé, ouvert.

G) Applications.

1° Redresseurs au sélénium.

Les redresseurs secs au sélénium concurrencent de plus en plus les valves à vide dans les applications radio-électriques et mis à part les installations de grande puissance avec convertisseurs à vapeur de mercure ils ont un champ d'applications très étendu dans le domaine du redressement industriel du fait des qualités suivantes :

— Robustesse — Durée illimitée — Pas de chauffage.

— Fonctionnement silencieux — Rendement élevé.

Par contre le redressement n'est pas parfait et les tensions redressées sont relativement faibles. La fréquence maximale d'emploi est limitée à 15 000 Hz dans les applications usuelles.

Les utilisations principales sont :

— Radioélectricité : alimentation des téléviseurs, des récepteurs tous courants ou pile-secteur, des cadres antiparasites.

— Alimentation des centraux téléphoniques à cause de leur rendement satisfaisant lorsque les variations d'intensités sont très rapides.

— Convertisseurs pour soudure électrique à l'arc en courant continu ($U = 70$ à 80 V ; $I = 300$ à 500 A).

— Installations d'électrolyse et d'électrochimie ($U = 5$ à 20 V ; $I > 1\,000$ A).

— Recharge de batteries d'accumulateurs pour centraux téléphoniques, véhicules électriques ou automobiles.

— Installations de précipitation électrostatique (dépoussiérage, peinture électrostatique).

— Alimentation de moteurs à courant continu avec possibilité de fractionner la puissance redressée en fractions indépendantes sans augmentation de prix de revient.

2° Redresseurs à l'oxyde cuivreux.

Ils ne sont plus guère utilisés actuellement. Ils ont cédé la place aux redresseurs au sélénium et aux diodes à cristal.

A puissance égale, ils ont un encombrement double des redresseurs au sélénium et leur vieillissement est assez prononcé.

Les deux applications subsistantes sont les appareils de mesure de tensions alternatives à cadre mobile et aimant permanent, et les modulateurs en télécommunications AF car ils ont un seuil de redressement plus faible et une capacité plus réduite que les redresseurs au sélénium.

V. DIODES A CRISTAL.

A) Principe.

Considérons une jonction *N-P* (1) schématisée à la figure 10-17. Les électrons libres du cristal *N* représentés par les signes (—) et les lacunes du cristal *P* par les signes (+) sont animés d'un mouvement désordonné en l'absence de champ extérieur.

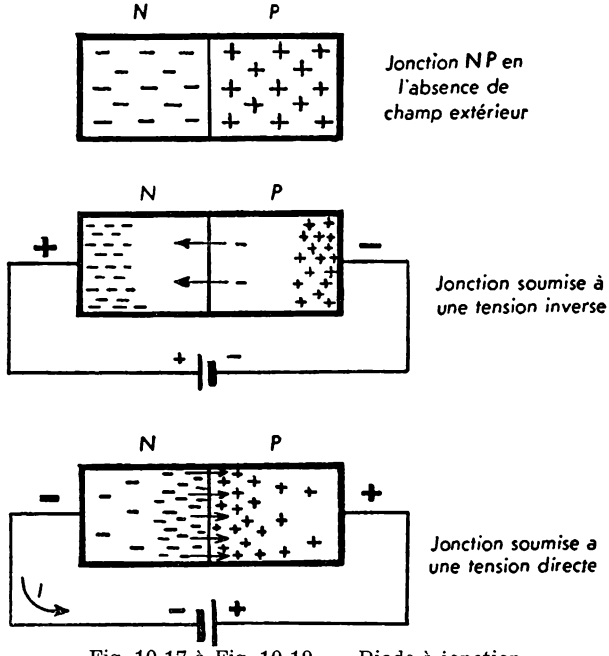


Fig. 10-17 à Fig. 10-19. — Diode à jonction

Si on applique une tension inverse (fig. 10-18) les électrons libres et les trous attirés par les polarités de sens contraire s'écartent de la jonction. Seuls les porteurs minoritaires arrivent à traverser la barrière de potentiel existante à la jonction. La résistance très grande dans le sens inverse (de 1 M Ω environ) ne permet le passage que d'un très faible courant.

Si au contraire on applique une tension directe (fig. 10-19) les porteurs majoritaires sont repoussés en grand nombre vers la jonction. Les polarités étant de signes contraires de chaque côté de la jonction, les électrons tra-

(1) L'étude des semi-conducteurs de type *P* et de type *N* a été faite au chapitre 5 du tome I.

versent en grand nombre la barrière de potentiel et viennent combler les trous qui se reforment constamment du fait du déplacement des électrons en sens contraire. La résistance dans le sens direct très faible (de quelques Ω) permet le passage d'un courant important qui augmente rapidement avec la tension appliquée.

La conductibilité unilatérale de la jonction *N-P* permet donc, comme le contact métal-semi-conducteur, de redresser les tensions alternatives.

B) Fabrication.

On utilise pour réaliser les jonctions *N-P* le germanium et le silicium dont les propriétés et la fabrication ont été étudiées dans le tome I.

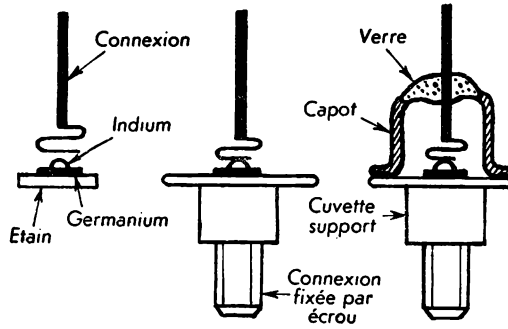


Fig. 10-20 à Fig. 10-22.
Fabrication d'une diode à jonction au germanium.

1° Diodes à jonction au germanium (fig. 10-20 à 10-22).

Les principales opérations sont les suivantes :

— Découpage de plaquettes de germanium de type *N* (activé à l'antimoine) dans le monocristal au moyen de scies circulaires diamantées.

— Décapage et collage sur des plaques de verre pour subir un rodage les amenant à la cote désirée.

— Obtention de la forme définitive par découpage aux ultra-sons (pastilles rondes) ou sciage de grande précision (pastilles carrées).

— Décapage, tri en épaisseur, contrôle et lavage.

— Montage dans un calibre d'une pastille de soudure en étain, d'une pastille de germanium de type *N* et d'une sphérule d'indium (1 mm³).

— Chauffage à 550 °C (¹) dans un four en atmosphère d'hydrogène purifié, où la jonction est réalisée par diffusion de l'indium à l'intérieur du cristal de germanium qui, localement, passe au type *P*. La diffusion pour une pénétration de quelques dizaines de microns exige plusieurs dizaines d'heures.

(¹) 1 200 °C pour le silicium.

— Soudage de la tige de connexion en tungstène sur la pastille d'indium (1). Cette connexion recourbée en forme de ressort est soudée dans un jet d'azote chauffé.

— Les éléments sont enfermés dans l'enveloppe comportant un capot soudé électriquement à la cuvette support. Le capot est surmonté d'un queusot permettant l'élimination de toute trace d'humidité par un séjour prolongé dans une cloche à vide.

— Fermeture du queusot.

— Contrôle et essais de durée.

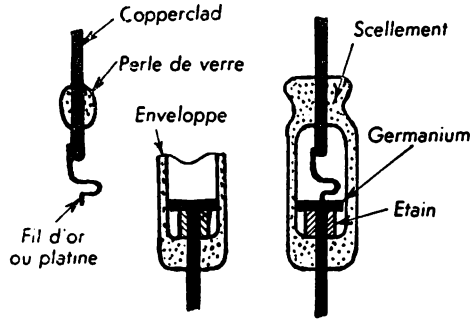


Fig. 10-23 à Fig. 10-25
Fabrication d'une diode à pointe au germanium

2° Diodes à pointe au germanium (fig. 10-23 à 10-25).

La préparation des plaquettes est identique à celle décrite pour les diodes à jonction.

— La connexion de cathode en copperclad est soudée au fond de l'enveloppe en verre. (∅ intérieur 1,5 mm, longueur 7 mm).

— L'enveloppe maintenue verticalement dans une forme en graphite, est remplie d'une pastille de soudure et d'une « puce » de germanium type *N*.

— Soudage de la pastille dans un four en atmosphère neutre.

— Décapage, rinçage et étuvage pour enlever toute trace d'humidité.

— Soudage de l'anode en copperclad dans une perle de verre.

— Le fil de connexion d'anode est ensuite prolongé par une fine pointe en fil d'or, de platine ou de tungstène de diamètre 10 μ environ obtenue par polissage électrolytique.

— La pointe est soudée au germanium et le tube fermé par soudure dans un solénoïde porté au rouge.

— La diode subit alors un traitement de formation (surintensité) qui crée une jonction *P-N* par diffusion d'impuretés de la pointe métallique dans le cristal de type *N*.

— Etamage des sorties, contrôle et essais.

(1) On utilise l'indium car c'est un métal mou qui fond à 350 °C dont l'utilisation est plus facile que les autres éléments du groupe III.

3° Diodes au silicium.

Elles sont fabriquées par des procédés analogues à ceux utilisés pour le germanium avec toutefois une plus grande difficulté d'obtention du silicium pur car son point de fusion est plus élevé que celui du germanium.

— **Diodes à pointe** (fig. 10-26 A).

Le fil constituant la pointe est aminci électrolytiquement puis soudé sur la plaquette de silicium. L'aluminium diffusé autour de la pointe forme la région de type *P*.

Le développement d'outillages semi-automatiques permet à l'heure actuelle de fabriquer ces diodes à des prix comparables à ceux des diodes à pointe au germanium.

— **Diode à jonction par alliage** (fig. 10-28 C).

La fusion de l'aluminium produit un alliage avec le silicium avec formation d'une zone *P* et d'une jonction avec le silicium de type *N*.

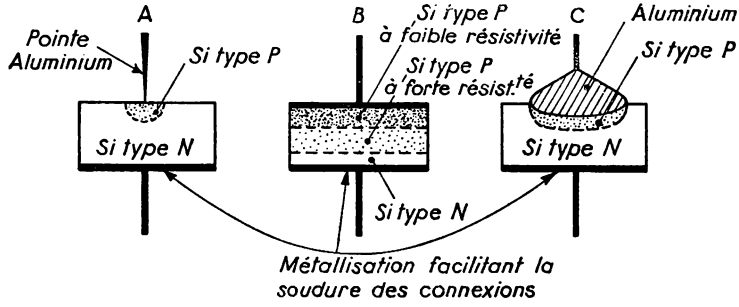


Fig. 10-26 à 10-28 — Diodes au silicium.

— **Diode à jonction par diffusion** (fig. 10-27 B).

La formation de zone *P* et de la jonction s'effectue par diffusion gazeuse de phosphore (obtention d'une zone de type *P* sur silicium de type *N*) ou de gallium (obtention d'une zone de type *N* sur silicium de type *P*).

Par rapport au procédé d'obtention par alliage la méthode par diffusion permet :

- un contrôle de profondeur de diffusion à 1 μ près,
- une pénétration plus homogène,
- des contraintes mécaniques à la jonction plus faibles.

Il en résulte une meilleure fiabilité (sécurité d'emploi), une dispersion plus faible des caractéristiques, une tension de claquage plus grande.

Lorsqu'on désire des diodes de grande surface avec moins grande précision sur la profondeur de la jonction, on utilise une diffusion de bore (obtention de type *P* sur silicium de type *N*) à partir d'une solution alcoolique d'anhydride borique.

C) Caractéristiques.

1° Diodes à pointe.

a) Caractéristique de redressement (fig. 10-29).

La courbe est analogue à celle étudiée pour les redresseurs secs. Le seuil de redressement est faible (0,1 V).

b) Tension inverse maximale de crete.

V_{Rmax} = 20 à 150 V.

c) Courant direct max. (courant continu).

I_{Fmax} = 60 à 200 mA.

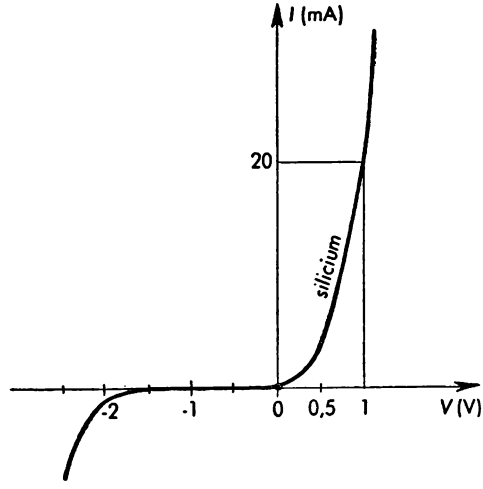


Fig. 10-29. — Caractéristique d'une diode à pointe

d) Courant direct max. de crete (pendant 1 s max.).

i_{Fmax} = 100 à 1 000 mA.

e) Courant moyen redressé.

I_0 = 20 à 50 mA.

f) Plages de températures.

— 40 °C à + 70 °C pour les diodes Ge.
— 40 °C à + 150 °C pour les diodes Si.

g) Fréquence maximale d'utilisation.

Jusqu'à une centaine de MHz pour les modèles ordinaires (C = 0,25 à 1 pF).

h) Coefficient de température.

Il est négatif et la résistance directe décroît lorsque la température augmente (libération d'électrons par l'agitation thermique).

2° Redresseurs à jonction (fig. 10-30).

a) Tension inverse maximale de crête.

20 à 300 V pour les redresseurs au Ge.
100 à 1 000 V pour les redresseurs au Si.

b) Intensité moyenne redressée.

100 mA à 20 A en refroidissement naturel
Jusqu'à 75 A en refroidissement forcé (5 m/s) } Redresseurs au Ge.

500 mA à 70 A en refroidissement naturel
Jusqu'à 220 A en refroidissement forcé (5 m/s) } Redresseurs au Si.

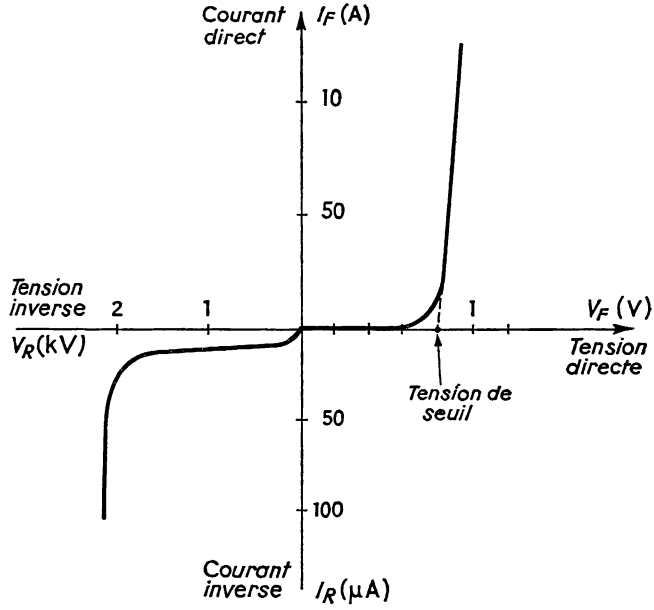


Fig. 10-30. — Caractéristique d'un redresseur au silicium.
Remarquer les échelles différentes pour les parties directes et inverses.

c) Plages de températures.

— 40 à + 60 °C pour les redresseurs Ge.
— 65 à + 115 °C pour les redresseurs au Si.

Les valeurs des intensités moyennes redressées sont données pour une température d'utilisation de 25 °C. Ces intensités diminuent lorsque la température augmente.

d) Fréquences maximales d'utilisation.

— 50 kHz pour les redresseurs au Ge.
— 15 kHz pour les redresseurs au Si.

D) Différents modèles.

— enveloppe verre, sorties par fils,
— enveloppe céramique, sorties par fils,
— fixation par embout vissé et tresse souple,
— fixation par enfichage,
— avec ou sans ailettes de refroidissement.

Les diodes à pointes comportent un anneau ou un point de couleur du côté de la cathode (fig. 2-27 et 2-28).

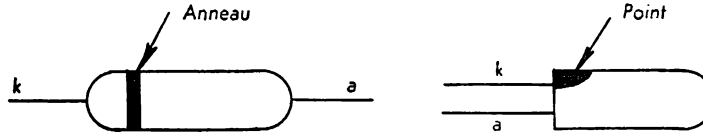


Fig. 10-31 et 10-32. — Diodes à pointe.

E) Applications.

Les nombreuses qualités des diodes à cristaux, que nous allons résumer ici, leur permettent de concurrencer victorieusement les diodes à vide en R.F. (diodes à pointe) et les redresseurs secs (diodes à jonction).

1° Avantages.

— Pas de chauffage d'où fonctionnement instantané;
— Rendement excellent pouvant atteindre 98 %;
— Faible capacité parallèle de l'ordre du picofarad;
— Résistance directe inférieure à celle des diodes à vide;
— Pas de courant de repos.
— Excellents détecteurs de bas niveau;
— Fréquences limites d'emploi élevées;
— Durée de vie pratiquement illimitée.
— Encombrement très réduit;
— Facilité de montage (sans support);
— Etanchéité d'où grande résistance à l'humidité et aux agents tropicaux;
— Les diodes à pointe sous verre ont une masse inférieure à 1 gramme.
— Grande résistance aux chocs pour les diodes à contact soudé.
— Diodes au silicium utilisables jusqu'à + 150 °C.

2° Inconvénients.

— Existence d'un faible courant inverse qui double pour une élévation de 10 °C (diodes au Ge) ou de 7 °C (diodes au Si);
— Tension inverse admissible plus faible que pour les diodes à vide;
— Les caractéristiques dépendent de la température mais elles retrouvent leurs caractéristiques normales après des variations de température importantes;
— Elles sont sensibles aux flux lumineux alternatifs qui peuvent occasionner des ronflements dans certains montages (protection des diodes sous verre par peinture opaque).

3° Utilisations.

a) DIODES A POINTE AU GERMANIUM.

— Détecteurs de tensions faibles et moyennes en radio et télévision;
— Discriminateurs en F.M.
— Générateurs d'harmoniques, mélangeurs, limiteurs;
— Modulateurs pour système de télécommunications à courants porteurs.

b) DIODES A POINTE AU SILICIUM.

D'emploi plus restreint, elles remplacent les diodes au germanium pour fonctionnement à des températures et des fréquences plus élevées.

— Commutation, machines à calculer.

c) REDRESSEURS A JONCTION.

Ils remplacent les redresseurs secs dans toutes les applications du redressement (redresseurs industriels de fortes et moyennes puissances, alimentation des téléviseurs, etc.). Des installations pour l'électrochimie utilisent des redresseurs au germanium et au silicium fournissant 100 000 ampères sous plus de 500 volts.

VI. TRANSISTORS A DEUX JONCTIONS.

A) Principe.

Considérons un transistor du type *NPN* (fig. 10-33). Si nous appliquons une tension positive au collecteur et une tension négative à l'émetteur tout en laissant la connexion de base libre on constate un déplacement des charges comme l'indique la figure. Seuls quelques électrons arrivent à franchir la barrière de potentiel constituée par la première jonction. Il existe un faible courant de repos qui augmente d'ailleurs avec la température du fait de l'agitation thermique.

Lorsqu'on applique une tension positive sur la base (fig. 10-34) émetteur et base constituent une diode à jonction polarisée dans le sens direct. Les

électrons injectés par l'émetteur dans la base n'ont pas le temps de se recombiner étant donnée la faible épaisseur de la base. Ils traversent la jonction collecteur-base sous l'action du champ élevé du collecteur.

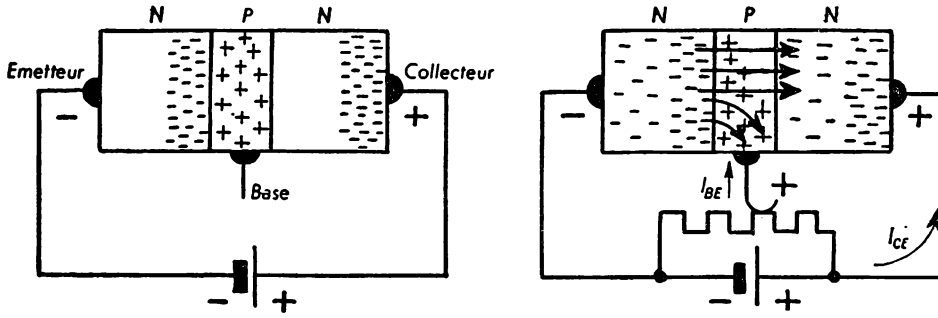


Fig. 10-33 et Fig. 10-34 — Transistor : principe

Le courant circule donc dans le sens collecteur-émetteur avec possibilité de faire varier sa valeur en modifiant la tension positive de la base.

Emetteur, base, collecteur jouent les mêmes rôles que cathode, grille, anode des triodes à vide avec les différences principales suivantes :

— courant de repos pratiquement nul;

— fonctionnement obligatoire avec courant de base;

— tension d'alimentation 10 à 100 fois plus faible qu'avec les tubes à vide.

L'explication reste valable pour un transistor *PNP* en remplaçant le terme électron par trou positif et en inversant le sens des courants.

B) Fabrication.

Les semi-conducteurs utilisés actuellement sont le germanium et le silicium avec des impuretés trivalentes (Al - Ga - In) pour l'obtention du type *P* et des impuretés pentavalentes (P - As - Sb) pour le type *N*.

Pour obtenir les jonctions plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Nous décrirons plus particulièrement la première qui est utilisée pour la fabrication des transistors de type courant.

1° Transistors obtenus par alliage.

Description de la fabrication d'un transistor au germanium du type *PNP* (fig. 10-35 à 10-38).

— Tirage d'un monocristal.

— Découpage de plaquettes de germanium du type *N*.

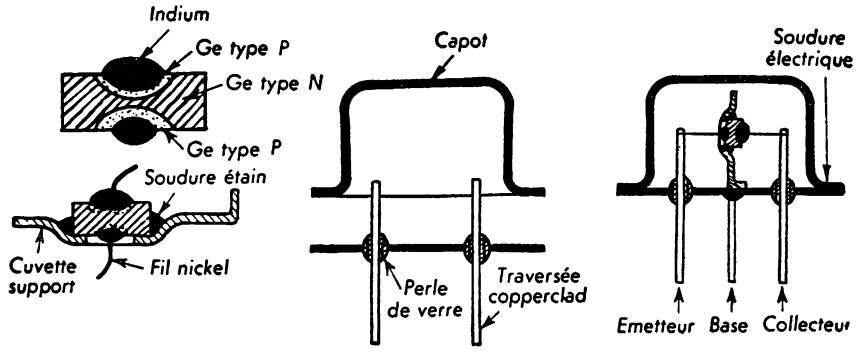


Fig. 10-35 à Fig. 10-38. — Transistors : fabrication

— Mise en position dans un gabarit spécial des éléments des deux jonctions (sphérules d'indium (1) et pastille de germanium) ainsi que d'une languette qui sera soudée à la pastille de germanium. Ce travail se fait dans une hotte antipoussière afin d'éviter tout risque de pollution.

— Obtention des jonctions après alliage intime de l'indium au germanium par chauffage dans un four en atmosphère réductrice.

— Préparation de l'enveloppe tout verre ou métallique avec traversées en kovar et perles de verre.

— Soudure sur chaque hémisphère d'indium d'un fil de nickel de 0,15 mm de diamètre.

— Soudure de la languette et des fils précédents sur les fils de sortie.

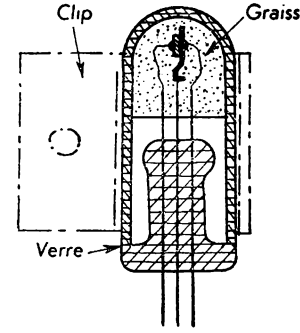


Fig. 10-39

— Décapage, lavage.

— Fermeture de l'enveloppe sous atmosphère sèche : capot métallique soudé électriquement (fig. 10-38) ou pied en verre soudé sur l'enveloppe verre (fig. 10-39). Le boîtier peut comporter un dégazeur (Getter).

— Etuvage, contrôle, essais et tri automatique des transistors.

Remarque : La fabrication des transistors est d'une minutie extrême : sphérules d'indium de quelques dixièmes de mm, tolérances de quelques μ sur le diamètre des fils de connexions, etc. Les opérations d'assemblage doivent être effectuées sous binoculaire. De nombreux contrôles sont pratiqués à tous les stades sans cesser d'observer une propreté méticuleuse.

2° Transistors obtenus par tirage.

Cette méthode consiste à faire croître le monocristal à partir d'un bain contenant deux types d'impuretés. En procédant à des réchauffages et

(1) La sphérule d'indium du collecteur est plus grosse que celle de l'émetteur donnant une surface de jonction collecteur plus grande permettant de collecter les porteurs divergents.

refroidissements successifs pendant la croissance on obtient des concentrations d'impuretés variables. Un découpage convenable permet d'obtenir des jonctions P*NP* au germanium ou *NPN* au silicium.

La difficulté dans cette méthode est de contrôler les épaisseurs et la concentration des impuretés. La capacité est plus faible mais les courants admissibles sont plus réduits.

3° Transistors obtenus par diffusion.

a) TRANSISTORS A BASE DIFFUSÉE « TECHNIQUE MÉSA » (fig. 10-40).

Sur une plaquette de germanium *P* constituant le collecteur on diffuse de l'arsenic en phase gazeuse. On obtient ainsi une base d'épaisseur très faible, de l'ordre de 1 μ. L'émetteur est ensuite obtenu soit par alliage (indium) soit par diffusion (aluminium). On utilise la technique des masques d'oxyde pour limiter la surface de diffusion (voir transistors plans).

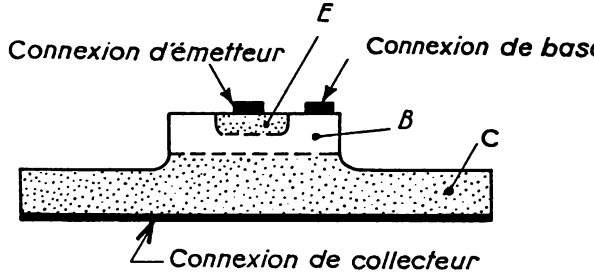


Fig. 10-40 — Transistor « Mésa ».

La structure dite « Mésa » est obtenue en découvrant le collecteur par une attaque chimique (mélange d'acides nitrique et fluorhydrique), les emplacements de base et d'émetteur étant protégés par un vernis.

Les emplacements des connexions sont métallisés sous vide (or, argent ou aluminium). Les fils de connexions sont fixés sur les éléments diffusés par thermo-compression et par soudure ordinaire sur le collecteur.

Cette technique est utilisable pour les transistors *PNP* au germanium ou pour les transistors *NPN* au silicium.

Avantages :

— Le contact de base à grande surface et forte conductibilité permet de réduire la résistance série de base.

— La structure Mésa en réduisant la surface de jonction entre collecteur et base ainsi que la faible épaisseur de base permettent d'obtenir une fréquence de coupure de 500 MHz.

— La grande surface de collecteur permet de laisser passer des courants collecteur importants (transistors RF de puissance).

b) TRANSISTORS PLANS « TECHNIQUE PLANAR » (fig. 10-41).

On utilise ici la technique des masques d'oxyde (bioxyde de silicium SiO_2) obtenus par combinaison d'oxygène avec le silicium.

Sur une plaquette de silicium de type *N* on réalise une couche d'oxyde qui est stable, isolante et inerte chimiquement (opération de passivation).

Par un procédé de photogravure chimique on pratique une fenêtre dans la couche d'oxyde à travers laquelle on diffuse du bore pour obtenir la base. On recouvre à nouveau d'oxyde. Au milieu de cette nouvelle couche on pratique une nouvelle fenêtre, on diffuse du phosphore pour obtenir l'émetteur. Après avoir formé à nouveau un masque d'oxyde protégeant les jonctions, on décape toujours par le même procédé de photogravure les emplacements de connexions qui seront recouverts d'aluminium vaporisé sous vide sur lequel les fils de sortie seront soudés.

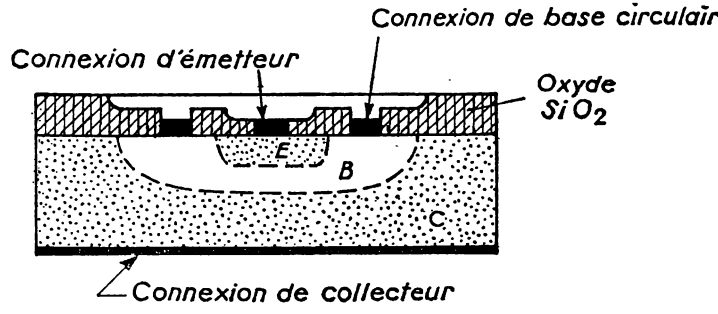


Fig. 10-41. — Transistor plan.

Avantages : Cette technique permet de contrôler la profondeur de diffusion à $\pm$ 0,2 μ près.

— La faible épaisseur de base (1 μ environ) permet d'atteindre une fréquence de coupure de 500 MHz.

— Les courants de fuite sont très faibles du fait de la protection assurée par la couche d'oxyde.

— La tension de claquage est élevée.

— Le niveau de bruit est 10 fois plus faible qu'avec les autres types de transistors.

— Des séries de plaquettes comportant une centaine de transistors peuvent être traitées simultanément. La dispersion des caractéristiques est faible.

— Ces éléments ont une excellente fiabilité.

c) EPITAXIE (fig. 10-42).

Cette technique consiste à faire croître sur un support une couche monocristalline dite « épitaxiale ». L'introduction d'impuretés permet l'obtention de dépôts monocristallins de type *N* ou de type *P*.

Ce dépôt est obtenu par voie chimique à partir du tétrachlorure de silicium

$$Si\,Cl_4 + 2\,H_2 \underset{\longleftarrow}{\xrightarrow{1\,200\,^{\circ}C}} Si + 4\,HCl$$

Le type N est obtenu par dopage au trichlorure de phosphore (PCl_3) et le type P par dopage au trichlorure de bore (BCl_3).

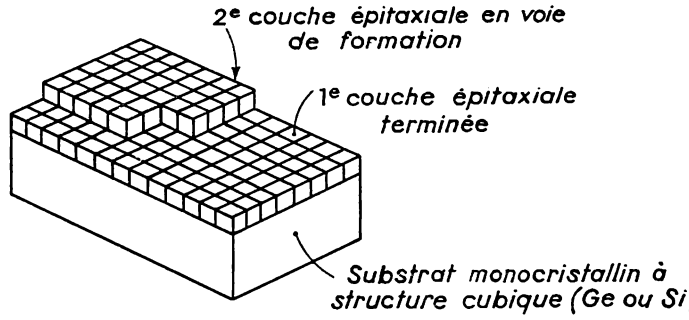

2e couche épitaxiale en voie de formation
1e couche épitaxiale terminée
Substrat monocristallin à structure cubique (Ge ou Si)

Fig. 10-42. — Couches épitaxiées.

Avantages.

— L'épitaxie est associée aux techniques « Mesa » et « planar » pour obtenir des transistors à hautes performances atteignant des fréquences élevées et pour la fabrication des circuits intégrés.

— Un transistor Mesa épitaxié comprend une couche collecteur ordinaire plus une couche collecteur inférieure épitaxiée dopée de façon plus poussée augmentant ainsi la conductibilité. Les transistors au silicium ainsi traités sont plus facilement saturables (intérêt en commutation où l'on utilise les deux états bloqué-saturé) et fonctionnent à des vitesses impulsionnelles plus grandes. Le gain en courant est plus élevé.

C) Caractéristiques.

1° Caractéristiques I_C V_{CE} émetteur commun (fig. 10-43).

Leur linéarité permet d'amplifier sans déformation en utilisant presque toute la longueur de la droite de charge expliquant ainsi le rendement élevé.

Bien que l'amplification en tension soit légèrement inférieure à l'unité, la résistance d'entrée étant de 1 000 Ω environ et la résistance de sortie de 30 000 Ω dans le montage à émetteur commun, le gain en puissance est important (20 dB).

Le gain en courant atteint 50.

Il existe 3 types de montages : base commune, émetteur commun et collecteur commun. (1)

2° Caractéristiques limites.

Les valeurs limites données par le fabricant telles que la tension collecteur-base (V_{CBmax}), la tension émetteur-base (V_{EBmax}), le courant collecteur (I_{Cmax}), doivent être considérées comme des limites absolues ne devant être dépassées en aucun cas.

(1) Voir : Schémas d'électronique du même auteur.

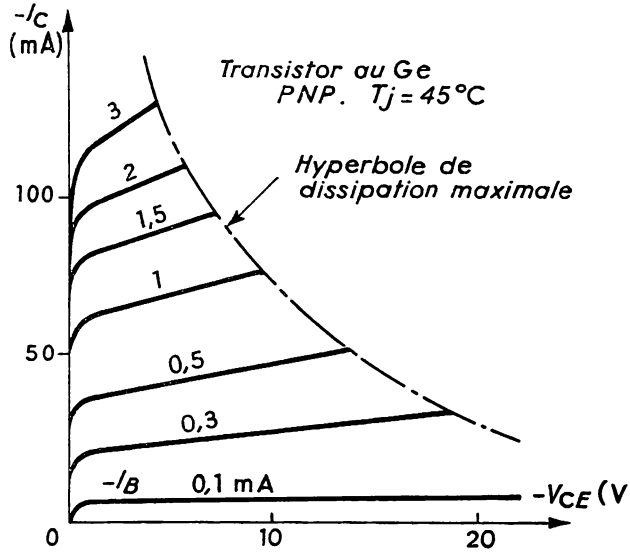


Fig. 10-43. — Caractéristique I_C V_{CE} d'un transistor.

3° Fréquence de coupure.

C'est la fréquence limite d'utilisation pour laquelle l'amplification de courant tombe à $1/\sqrt{2}$ de sa valeur en basse fréquence, ce qui correspond à un affaiblissement de 3 dB.

Elle est généralement indiquée pour le montage à base commune.

Elle a pour valeur approximative suivant les types :

1 MHz : transistors A.F.
10 MHz : transistors R.F.
100 MHz : transistors tétrodes, transistors Drift.
500 MHz : transistors plans, transistors Mésa.
1 000 MHz : technétron.

Pour augmenter la fréquence de coupure on utilise les moyens suivants :

— Accroissement de la mobilité des charges.

La mobilité des électrons étant supérieure à celle des trous, les transistors *NPN* peuvent être utilisés à des fréquences supérieures à celles des transistors *PNP*.

— Diminution de la capacité collecteur.

On réduit la surface de jonction (transistor Mésa) ou on interpose une couche intrinsèque (transistor *PNIP*).

— Diminution du temps de transit (1).

(1) Le temps de transit t est donné par : $t = e^2/2D$, e étant l'épaisseur de la base et D une constante de diffusion qui dépend du semi-conducteur constituant la base.

On réduit l'épaisseur de la base (transistors diffusés). L'épaisseur de la base d'un transistor obtenu par alliage ne peut pas être inférieure à 40 microns alors qu'elle est de l'ordre de 1 micron pour un transistor plan. La fréquence de coupure varie comme l'inverse du carré de l'épaisseur de la base.

— Suppression de la jonction.

On réduit conjointement la section de passage des porteurs (transistors à barrière de surface, transistors à effet de champ).

4° Puissance dissipée maximale (à 25 °C).

Elle dépend évidemment des types considérés. Les limites permises actuellement sont :

50 W pour les transistors A.F. au germanium.

80 W pour les transistors R.F. au silicium.

Récemment cette puissance a été portée à 300 W pour les transistors au silicium en basse fréquence.

On peut accroître la puissance dissipée en augmentant la densité d'impuretés. Il faut pour cela utiliser des impuretés (Al, Ga, B) plus solubles dans le germanium que ne l'est l'indium.

— Refroidissement : Il est réalisé par convection sur les transistors de petite et moyenne puissance et par conduction sur les transistors de forte puissance.

La protection contre la chaleur peut être obtenue sur les transistors ordinaires au moyen d'un clip en cuivre ou sur les transistors de puissance en réunissant le collecteur au boîtier qui sert de radiateur thermique et évacue la chaleur au châssis.

5° Température maximale d'utilisation.

Elle est d'environ 100 °C pour les transistors au germanium et 200 °C pour ceux au silicium.

Pour augmenter cette limite les recherches s'orientent vers des semiconducteurs plus réfractaires tels que le carbure de silicium (350 °C).

D) Différents modèles.

Les transistors ordinaires sont protégés par des enveloppes en verre ou des boîtiers métalliques avec sorties par fils. Le repérage des électrodes se fait conformément aux figures 10-44 et 10-46.

Les transistors de puissance sont fixés par filetage central ou par vis latérales avec refroidissement par contact au châssis. Pour des puissances élevées ils comportent des ailettes de refroidissement.

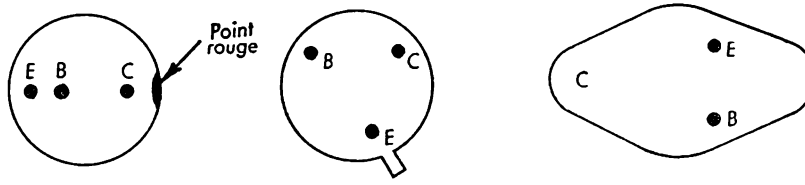


Fig. 10-44 à 10-46. — Repérage des électrodes des transistors.

E) Applications.

Les transistors peuvent remplir toutes les fonctions des tubes électroniques aux petites puissances.

Par rapport aux tubes électroniques ils réunissent les avantages suivants :

— Encombrement très réduit.
— Très faible consommation.
— Durée de vie extraordinaire (100 000 heures).
— Grande résistance aux chocs et aux pressions.
— Simplicité des montages.

Les limites de puissance, de fréquence de température sont reculées constamment par l'évolution de la technique et les transistors voient s'étendre leur champ d'applications.

Sans entrer dans le détail des multiples applications nous pouvons mentionner les domaines où le transistor est roi :

— les radiorécepteurs portatifs;
— les appareils de prothèse auditive;

et ceux où il est en pleine expansion :

— télévision;
— machines à calculer électroniques.

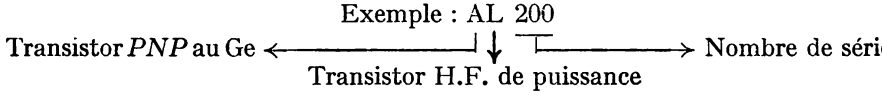
1re lettre	2e lettre	Groupe final
Type	Fonction	Nombre de série
A Diodes et transistors au Ge	A Diodes de détection et commutation	3 chiffres : usage courant 1 lettre et 2 chiffres : usage professionnel
B Diodes et transistors au Si	B Varicaps	
C Diodes et transistors au GAs	C Transistors AF de faible P	
D Diodes et transistors au In Sb	D Transistors AF de P	
R Matériau semi-conducteur pour cellules photoconductrices et générateurs à effet Hall	E Diode tunnel	
	F Transistors RF de faible P	
	L Transistors RF de P	
	P Photodiodes	
	R Thyratrons faible P	
	S Transistors de commutation	
	T Thyratrons forte P	
	U Transistors de commutation, forte P Multiplicateurs de f (Varactors)	
	Y Redresseurs de P	
	Z Diodes régulatrices	

VII. CODE.

Les semi-conducteurs d'usage courant sont désignés par deux lettres suivies de trois chiffres.

Les semi-conducteurs pour usage professionnel sont désignés par trois lettres suivies de deux chiffres.

La signification des lettres est la même dans les deux cas.



VIII. NORMES.

UTE C 53-210 : Eléments redresseurs et groupes redresseurs à semi-conducteurs polycristallins (1962).

SITELESC-313 : Symboles littéraux pour les dispositifs à semi-conducteurs (1961).

SITELESC-314 : Symboles graphiques pour les dispositifs à semi-conducteurs (1961).

FNIE 031 : Recommandations relatives à l'utilisation des dispositifs à semi-conducteurs (1962).

CCT 13-01 : Transistors à jonction (1961).

CCT 13-02 : Diodes à pointes (1961).

CCT 13-03 : Diodes régulatrices de puissance (1962).

CCT 13-04 : Diodes de redressement (1962).

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

Ouvrages.

M. G. SAY, *Alliages magnétiques et ferrites*, Dunod, Paris, 1956.

M. FOURNIER, *L'ère des matières plastiques*, 3e édition, Dunod, Paris, 1961.

BESSON, *Technologie des résistances et potentiomètres*, T.P., Paris, 1956.

BESSON, *Technologie des condensateurs fixes*, T.P., Paris, 1955.

BESSON, *Technologie des composants électroniques*, Editions de la Radio, Paris, 1967.

DESCHEPPER, *Les condensateurs électriques*, Dupuis, Paris.

CHAMPEIX, *Physique et technique des tubes électroniques*, Dunod, Paris, 1960.

CHAUSSIN, *Plastiques*, Dunod, Paris, 1961.

LEMASSON ET BLAIN, *Matériaux de construction mécanique et électrique*, 2e édition. Dunod, Paris, 1965.

Normes.

AFNOR. ([1]), 23, rue Notre-Dame des Victoires, Paris (2e).

U.T.E. ([2]), 54, avenue Marceau, Paris (8e).

C.C.T. ([3]), 76, rue du Général-Leclerc, Issy-les-Moulineaux (Seine).

S.N.I.R. ([4]), SITEL ([5]), 23, rue de Lubeck, Paris (16e).

Notices des constructeurs.

([1]) AFNOR : Association Française de Normalisation.
([2]) U.T.E. : Union Technique de l'Electricité.
([3]) C.C.T. : Comité de coordination des Télécommunications.
([4]) S.N.I.R. : Syndicat National des Industries Radioélectriques.
([5]) S.I.T.E.L. : Syndicat des Industries de Tubes Electroniques.

INDEX ALPHABÉTIQUE (I)

A

Accepteur, 222.
Acétate de cellulose, 59.
Acétochlorure de polyvinyle, 54,
Aciers 25.
— (désignation des), 22.
— à aimants, 30.
— à l'aluminium, 30.
— alliés, 23.
— au carbure, 30.
— au silicium, 27.
— inoxydables, 27.
— non alliés, 26.
Activateur, 207, 214.
Afcodur, 58.
Afcovyl, 58.
Aimantation (courbe de première), 15.
Aimants (manipulation des), 32.
Aimants permanents, 14.
Aimants (utilisation des), 32.
Alcomax, 16, 32, 34.
Alkydes, 59.
Alliage AFK, 30.
— *APM*, 37, 38.
— *ASV*, 29.
— Fer-Carbone, 25.
— *HPM*, 27, 31.
— *NMHG*, 29, 31.
— *190*, 37.
— *1040*, 28.
Almélec, 37, 38.
Alni, 32, 33.
Alnico, 32, 33.
Alpacca, 37.
Alpax, 37, 38.
Alumag, 37.
Alumine, 36, 49, 50, 83, 180.
Aluminium, 36, 37, 135.
Amanimphy, 29.
Amiante, 48.
Aminoplastes, 55, 59.
Ampoule, 163.
Angle de déphasage, 18.
Angle de pertes, 18.
Anhyster, 28, 31.
Anode, 163, 176, 190.
Anode cavitrap, 203.
Anode postaccélératrice, 211.
Antifriction, 37.
Antimoine, 43.
Araldite, 57, 60.
Ardoise, 48.
Argent, 39, 126.
Arsenic, 43.
Atome, 1.
Auto-cicatrisation, 140.
Axes de commande, 105, 112.
— (dimensions des), 101.

B

Bakélite, 58, 60.
Barrière de potentiel, 225.
Baryum, 39, 168.
Bauxite, 36.
Bismuth, 43.
Blindages, 183.
Bobinage des condensateurs, 135, 137.
Bobinages (pertes dans les), 17.
Bois, 51.
Boîtier des potentiomètres, 105, 110, 113.
Boltzmann (constante de), 12.
Bore, 41.
Borique (acide), 147.
Borne, 71.
Borosilicaté (verre), 48.
Brillance, 209.
Broche, 70.
Bronze, 35, 37.
Bruit de fond, 81, 201.
Buna, 59.
Butyl, 59.

C

Câbles isolés, 65.
— blindés, 65.
— coaxiaux, 65.
Cadmium, 39.
Calcium, 39.
Calit, 50.
Canon, 106, 108, 206.
Caoutchouc, 12, 52, 60.
— *AXF*, *GRS*, 59.
Capacité d'électrode, 165.
— d'interélectrode, 165, 194.
— (formules), 122.
— nominale, 122, 123, 128.

(I) Les noms en italiques correspondent à des appellations commerciales.

Caractéristique de fréquence, 81.
Caractéristiques des condensateurs, 123.
— des diodes, 188, 227, 236.
— des pentodes, 200.
— des potentiomètres, 101.
— des redresseurs, 227.
— des résistances, 80.
— statiques, 187, 193.
— des tétrodes, 197.
— des transistors, 244.
— des triodes, 193.
— des tubes électroniques, 164.
Carbone, 42.
— colloïdal, 91, 111.
— pyrolitique, 93.
Carbure de silicium, 224.
Carton, 52.
Cathodes, 163, 188, 210.
Celluloïd, 54.
Cellophane, 51.
Céloron, 58.
Céramiques, 9, 50, 129, 180.
Cérésine, 12.
Cerfeuil, 144.
Cermet, 118.
Césium, 38.
Champ coercitif, 16.
— magnétique, 11
Chaux, 39, 49.
Child. Langmuir, 187.
Chrome, 43.
Chromel, 83.
Chrysocale, 35, 37.
Claquage, 7.
Classification périodique, 3, 40.
Cobalt, 44.
Cobanic, 44, 169.
Code des couleurs, 97, 161.
— des substances luminescentes, 214.
— des transistors, 247.
— des tubes, 216 à 218.
Coefficient de déviation, 208.
Coefficient de température, 11, 81, 124.
— de tension, 81.
Concentration, 206.
Commutateur, 75.
Compactron, 205.
Concréfaction, 32.
Condensateurs à film plastique, 143.
— à l'aluminium, 148.
— au mica, 125.
— au papier, 134.
— au tantale, 155.
— céramiques, 129.
— (décharge des), 6.
— fixes, 122.
— électrochimiques, 147.
— électrolytiques, 147.
— (pertes dans les), 17.
— spiralés, 157.
Conductance, 10.
Conducteur, 5, 11.
Conducteurs, 21.
Conductivité, 10.
Connecteur, 69.
Constantan, 36, 37, 87.
Contacts, 110.
Convergence, 208.
Copolymérisation, 54.
Copperclad, 29, 35, 179.
Cosses, 72.
Coton, 53.
Couche électronique, 2.
Courant d'anode, de grille, 164.
— de pointe, 164.
Course du curseur, 102.
Covalente, 3.
Cristal, 49.
Cristaux, 4.
Cryolithe, 36.
Cuivre, 34.
Culot, 163, 185.
Cupron, 39, 87.
Cupro-nickels, 36, 82, 104.
Cuproxyde, 226.
Curie (point de), 16.
Curseur, 105, 108, 112.
Cycle d'hystérésis, 15, 33.

D

Décal (culot), 167.
Décharge d'un condensateur, 6.
Déclin, 208.
Dégazeur, 185.
Densité d'un faisceau, 208.
Désaimantation (courbe de), 16.
Déviation électrostatique, 209.
Diaflon, 56.
Diamant, 4, 42.
Diélectrique, 6, 122.
Différence de potentiel, 9.
Dilver, 29, 179.
Diode à jonction, 232.
— à pointe, 234.
— à vide, 186.
Disques scellés, 182.
Disruptive (tension), 6.
Dissipation nominale, 96, 102.
Distorsion en trapèze, 208.
— du spot, 208.
Diviseur de tension, 79, 101.
Donneur d'électrons, 222.
Douilles, 70, 71.
Duodécal (culot), 167.
Duralinox, 37, 38.
Duralumin, 37, 38.
Dynatron (effet), 197.

E

Ebonite, 12, 52.
Ecran d'oscilloscope, 206, 212.
Effet dynatron, 197.
— Edison, 186.
— d'ilot, 196.
— Joule, 12.
— Miller, 195.
— pelliculaire, 13.
— Schottky, 189.
Elastomères, 59, 62.
Electrocinétique, 9.
Electrodes d'accélération, 211.
— de concentration, 211.
— de contrôle, 210.
— de modulation, 210.
Electron, 1.
Electrostatique, 5.
Electrovalente, 3.
Emaux, 50.
Embase, 163.
Emission secondaire, 197.
— thermoélectronique, 186.
Energie, 13, 80.
Enveloppe, 163. 179.
Epitaxie, 243.
Epoxy, 8, 57.
Essais des condensateurs fixes, 159.
— potentiomètres, 120.
— résistances, 97.
— tubes électroniques, 218.
Etain, 42.
Ethoxylines, 57.
Extrinsèque (conductibilité), 222.

F

Fabrication des anodes, 179.
Fabrication des cathodes, 173.
— condensateurs fixes, 129, 135, 148, 155.
— grilles, 176.
— isolants synthétiques, 54.
— potentiomètres au carbone, 111.
— potentiomètres bobinés, 104, 107,
— résistances, 88, 91, 93, 95.
— tubes électroniques, 184.
— du germanium, 223.
Facteur d'amplification, 164, 194, 199.
Fatigue, 208.
Facteurs d'amplification, 184.
Fer et alliages, 24.
Fer divisé, 25.
Ferimphy, 25, 32.
Fernico, 29, 179.
Ferrocobalts, 30.
Ferromagnétique (substance), 14.
Ferronickels, 28.
Fibre, 52.
Fiches, 69, 71.
Filaments, 170.
Fils argentés, 65.
— divisés, 64.
— émaillés, 64.
— gainés, 64.
— isolés, 64.
— nus, 64.
Finesse du spot, 209.
Fluorescence, 207.
Fluoréthène, 56.
Flux pour soudage, 35.
Fréquence de coupure, 245.
Fontes, 25.
Fontes (désignation des), 22, 26.
Formation, 137, 149.
Formophénoliques, 58.
Forstérite, 50, 180.
Fortal, 37, 38.
Fréquence (caractéristique de), 81.
Fréquenta, 50.
Frittage, 32.

G

Galalithe, 54.
Géométrie de la triode, 194.
Germanium, 42, 222.
Germe, 223.
Getter, 185.
Gobinyl, 58.
Graphite, 4, 42, 91, 178.
Grille, 163, 174, 192.
— d'arrêt, 199.
— écran, 196.
Gutta-percha, 52.

H

Halo, 208.
Harmoniques, 201.
Hélium, 70.
Heptode, 204.
Hexode, 204.
Hilanic, 44, 169.
Hilo, 169.
Hipernic, 28.
Hipersil, 27, 31.
Huile, 51, 60.
Hystérésis (cycle d'), 15, 33.
— diélectrique, 9.
— (pertes par), 16.
Hydrocarbonés (composés), 56.
Hyperluminosité du spot, 208.

I

Identification des condensateurs, 124.
— — potentiomètres, 102.
— — résistances, 82.
— — tubes électroniques, 165.

Impédance effective d'entrée, 165.
Imphysil, 27, 31.
Imprégnation, 12, 135, 137, 139, 149.
Inconel, 37.
Indium, 41.
Induction à saturation, 15.
— magnétique, 14.
— rémanente, 16.
Intensité, 9.
— nominale, 96, 102.
Interrupteur, 113, 73, 74.
Intrinsèque (conductibilité), 221.
Inverseur, 73.
Ions, 2.
Iridium, 45, 90.
Isolant, 5.
Isolant, 46.
— (caractéristique des), 60.
— minéraux, 48.
— organiques, 51.
— synthétiques, 53.
Isoperm, 29.

J

Jaconas, 53.
Joule (pertes par effet), 12.

K

Kaolin 50.
Kelvin, (pertes par effet), 13.
Kénotron, 186.
Klégécell, 59.
Kovar, 29, 179.

L

Lacune, 222.
Laiton, 35, 37.
Latex, 52.
Lexan, 144.
Liant, 208.
Limites d'emploi des condensateurs fixes, 128, 133, 141, 146.
— des condensateurs electrolytiques, 154.
— des potentiomètres au carbone, 116.
— des potentiomètres bobinés, 107, 109, 101.
— des résistances au carbone, 92.
— des résistances bobinées, 86, 89.
— des résistances à film, 90, 95.
Lithium, 38.
Locktal (culot), 166.
Lois de variations des potentiomètres, 114, 119.
Loi d'ohm, 10.
Loi de Child. Langmuir, 187.
— de Richardson, 187
Lucoflex, 58.
Lucogel, 58.
Lucolène, 58.
Luminescence, 207.

M

Macromolécules, 54.
Magnésie, 39, 50.
Magnésium, 39.
Magnétisme, 14.
Magnétostriction, 30.
Maillechort, 36, 37.
Makrofol, 144.
Manganèse, 44.
Manganin 11, 37, 44, 87.
Manœuvre, 102.
Marquage des condensateurs, 160.
Marquage des redresseurs, 230.
Marquage des résistances, 97.
Médium (culot), 166.
Mercure, 41, 173.
Merlon, 144.
Métaux ferreux (désignation des), 22.
Métaux non ferreux (désignation des), 24.
Méthyle, 57.
Mica, 8, 48, 60, 126, 184.
Micalex, 48.
Micanite, 48.
Miniature (culot), 166.
Modulation (électrode de), 207.
Molécule, 3.
Molybdène, 43, 170, 174.
Monel, 35, 37.
Monocristal, 223.
Moplefan, 144.
Mumétal, 28, 31, 33.
Mylar, 57, 143.

N

Naphtalène, 135.
Néoprène, 59.
Neutron, 1.
Nickel, 44, 176.
Nickrome, 37, 83.
Nombre atomique, 3.
Nombre de masse, 2.
Noval (culot), 166.
Noyau, 1.
Nylon, 54, 59.

O

Octal (culot), 166.
Octode, 203.
Ohm (loi d'), 10.
Or, 39.
Organes de jonction, 67.
Oscilloscope, 208.

Oxydes, 95, 168, 188, 225, 231.
Oxymétal, 226.
Ozokérite, 51, 60, 135.

P

Palladium, 45, 90.
Papier, 52, 60, 134.
Paraffine, 12, 59, 60, 134.
Paramètres de la triode, 194.
Particules, 1.
Pente, 164, 194, 196, 199, 201.
— de conversion, 203.
Pentode, 199.
Permalloy, 28, 31.
Permandur, 30, 31.
Perméabilité, 14.
Permittivité, 7.
Permivar, 29, 31.
Persistance, 214.
Pertes dans les bobinages, 17.
Pertes dans les condensateurs, 18.
— diélectriques, 9.
— par courants de Foucault, 13.
— par effet Joule, 12.
— par effet pelliculaire, 13.
— par hystérésis, 16.
Pervéance, 187.
Phénoplastes, 58.
Phosphorescence, 207.
Pied d'un tube électronique, 163.
Piste, 111.
Plaque, 163.
Plaques de déviation, 211.
Plaquette résistante, 104, 111.
Platine, 45.
Plexiglas, 57.
Plomb, 42.
Plomb (verre au), 49, 180.
Point de Curie, 16.
Poison, 208.
Polyamides, 59.
Polycarbonate, 144.
Polychlorure de vinyle, 58, 60.
Polycondensation, 54.
Polyesters, 8, 56, 143.
Polyéthylène, 54, 56, 60.
Polyisobutylène, 59.
Polymère, 54.
Polymérisation, 54,
Polymétacrylate de methyle, 57.
Polypropylène, 144.
Polystyrène, 54, 56, 60, 143.
Polystyrol, 56.
Polytétrafluoréthylène, 56, 60, 144.
Polythène, 56.
Polyuréthane, 58.
Porcelaine, 50, 60.
Postaccélération, 211.
Potasse, 49.
Potassium, 38.
Potentiomètres ajustables, 100, 117.
— au carbone, 111.
— bilogarithmiques, 113.
— bobinés, 104.
— linéaires, 113.
— logarithmiques, 113, 119.
— multiples, 116.
— pseudo-log., 109.
— vitrifies. 109.
Pouvoir émissif, 187.
Presspahn, 52.
Proton, 1.
PTFE, 144.
Puissance, 12, 80, 164.
Puissance nominale, 80, 82.
Pyralène, 135.
Pyrex, 49, 90.

Q

Quartz, 48, 60.

R

Radiométal, 28.
Rectimphy, 28, 31, 33.
Redresseurs secs, 225.
Redressement, 191, 225.
Refroidissement, 176, 229.
Relais électromagnétiques, 75.
Rendement lumineux, 214.
Résines, 53.
Résistance, 9. 79.
— interne, 164, 189, 194, 196, 199.
— isolée, 81.
— nominale, 80, 82, 86, 89, 90, 92, 94.
— résiduelle, 101.
— totale, 101.
Résistances à couche, 93, 95.
— à film, 90, 95.
— agglomérées, 91, 96.
— à haute stabilité, 95.
— ajustables, 100, 103.
Résistances à ruban ondulé, 86.
— au carbone, 91.
— bobinées de précision, 87, 96.
— bobinées de puissance, 83, 96.
— cimentées, 84.
— émaillées, 84.
— fixes, 79.
— métalliques, 83, 90.
— non protégées, 84.
— non inductives, 89.
Résistances.
— réglables, 100.
— semi-vitrifiées, 85.
— sous porcelaine, 86.
— sous verre, 86.
— tropicalisées, 88.
— vitrifiées, 84.

Résiste, 56.
Résistivité, 9, 79.
— superficielle, 12.
Résistol, 55.
Résol, 55.
Rhéostat, 100.
Rhodium, 45.
Rhodotd, 59.
Rhodopas, 58.
Rhométal, 29.
Rhovilite, 58.
Richardson-Dushmann (loi de), 187.
Rigidité diélectrique, 7.
Rilsan, 59, 60.
Rimlock (culot), 166.
Rutile, 50.

S

Saturation, 188.
Schottky (effet), 189.
Sélénium, 44, 231 226.
Semi-conducteur, 6, 11.
Semi-conducteurs, 221.
Sensibilisateur, 207.
Sensibilité d'écrans, 213.
— de déviation, 208.
Seuil de redressement, 227.
Silastic, 62.
Silastène, 63.
Silice, 49.
Silicium, 42, 222.
Silicones, 12, 60, 61.
Skiatron, 209.
Skinplate, 59.
Sodium, 38.
Soie, 53.
Sorties des condensateurs, 136.
Soude, 49.
Souffle, 81.
Spot, 206.
Stéatite, 50, 60, 129.
Stratifiés, 56.
Strontium, 39, 168.
Styroflex, 56.
Subminiature (culot), 167.
Substances pour écrans, 214.
Supermalloy, 28, 31.
Support d'électrodes, 184, 213.
— de tube, 68.
— de transistor, 68.
— résistant, 107.

T

Talc, 50.
Tangentite, 50.
Tantale, 42, 155.
Téflon, 56.
Telphy, 29.
Température (coefficient de), 81.
— (influence de la), 11.
— maximale de service, 81, 102.
— nominale de service, 80, 102.
Tension, 9.
— (coefficient de), 81.
— d'anode, 164, 186.
— de blocage, 208.
— de grille, 164.
— de service, 7.
— d'essai, 7.
— disruptive, 7.
— inverse de pointe, 164.
— maximale de service, 80.
— nominale des condensateurs, 123, 125, 158.
— nominale des résistances, 80.
Tétrachlorure de silicium, 224.
Tétrode, 196.
Textiles, 53.
Thallium, 41.
Thermodurcissables, 55.
Thermoélectronique (émission), 186.
Thermoplastiques, 55.
Thiokol, 59.
Thorine, 171.
Thorium, 41, 168, 172.
Ticonal, 16, 32, 34.
Tirage d'un monocristal, 223
Titane, 41, 182.
Titanates, 60, 129.
Tolérances sur Cn, 123.
— sur Rn, 80, 82.
Tombac, 35.
Tophet, 83.
Trace du spot, 206.
Traînage, 16.
Transconductance, 164, 194.
Transcontinental (culot), 166.
Transistor, 239.
— à alliage, 240.
— à base diffusée, 242.
— à tirage, 241.
— Mésa, 242.
— plan, 243.
Transit (Temps de), 191, 201.
Transmodulation, 201.
Traversées, 72.
Triode, 191.
Trolitul, 56.
Tubes cathodiques, 205.
— électroniques, 163.
— multiples, 204.
Tungstène, 43, 168, 170, 188.
Types n et p, 222.

U

Ultra-calan, 50.

V

Valence, 3.
Valve d'alimentation, 189.
Vectolite, 34.
Védal, 38.
Verre, 7, 48, 60, 146, 180.

W

Weiss (domaines de), 28.
Wehnelt, 210.

Z

Zamak, 37, 39.
Zinc, 39.
Zirconium, 41.
Zone fondue, 223.

6346-1-69. Imprimerie Bayeusaine, rue Royale, Bayeux. Dépôt légal : 5 949 1er trim. 1969
Imprimé en France

SCHÉMAS D'ÉLECTRONIQUE

Matériel des télécommunications

Préparation au baccalauréat de technicien et au brevet de technicien supérieur électronicien

PAR

J. MORNAND

TOME I. — 224 pages 22 x 30. Nouveau tirage 1967. Broché ..... **17,80** F

TOME II. — *Option "télécommunications".* 224 pages 22 x 30, avec 480 figures. 1967. Broché ..... **17,80** F

ÉLECTRONIQUE

Préparation au baccalauréat de technicien en électronique

PAR

A. SIREDEY

TOME I. — *Classes de 1re F2.* 360 pages 16 x 25, avec 415 figures. *2e édition.* 1968. Cartonné ..... **24** F

TOME II. — *Classes terminales F2*..... *En préparation*

ALGÈBRE DE BOOLE

Schémas électriques Automatismes

Classes de 1res F1, F2, F3, baccalauréat de technicien

PAR

R. CLÉMENT **F. DEGOULANGE**

288 pages 16 x 25, avec 442 figures et 74 tableaux. *2e édition.* 1969. Cartonné ..... **23** F

Ces ouvrages sont inscrits sur la liste des manuels adoptés par les écoles de la Ville de Paris

DUNOD ÉDITEUR, 92, RUE BONAPARTE - PARIS-6e - 326-99-15